DOSSIER SPÉCIAL

Les colères de la Terre p.30

SCIENCES ET AVENIR
La Recherche

© STEFAN DILLER/AKG/PHOTOMONTAGE SetA

Découverte d'un fragment du IIe siècle

L'ÉVANGILE OUBLIÉ

qui bouleverse la Bible

p.78

SCIENCES ET AVENIR / LA RECHERCHE - N° 923 - JANVIER - L'ÉVANGILE OUBLIÉ

JANVIER 2024 - N° 923 - ALLEMAGNE 7,40 € / ITALIE 5,70 € / LUXEMBOURG 5,70 € / GRÈCE 5,70 € / BELGIQUE 5,70 € / ESPAGNE 5,70 € / PORTUGAL 5,70 € / DOM 5,90 € / TOM 800 XPF / ILE MAURICE : 8,60€ / TOM (AVION) 1500 XPF / SUISSE 9,50 CHF / TUNISIE 10 TND / MAROC 55 DH / CANADA-USA 8,20 $

L 13418 - 923 - F: 5,30 € - RD

Avast One

L'INGÉNIERIE SOCIALE, ET COMMENT S'EN PRÉMUNIR ?

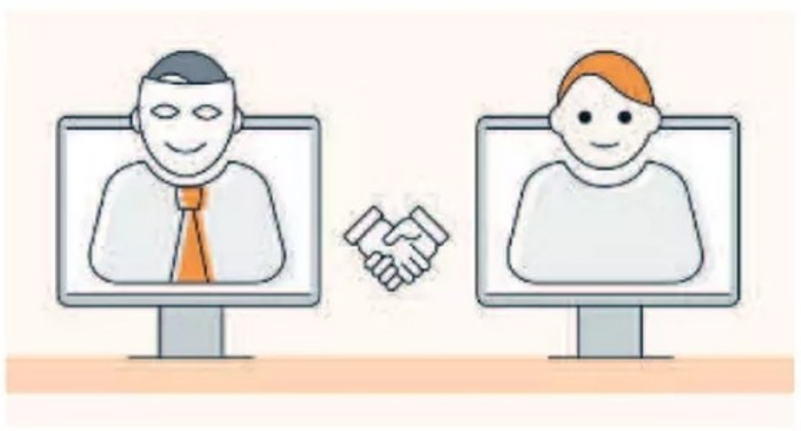
Dans toute chaîne de sécurité, le maillon faible est en général l'élément humain, car il est sensible à toutes sortes de tactiques de manipulation. Les techniques d'ingénierie sociale tirent parti de cette vulnérabilité humaine pour inciter les victimes à divulguer leurs informations privées. Apprenez à repérer une attaque par ingénierie sociale.

Qu'est-ce que l'ingénierie sociale ?

L'ingénierie sociale désigne la pratique consistant à utiliser des techniques psychologiques pour manipuler le comportement de quelqu'un. L'ingénierie sociale exploite l'erreur humaine et encourage les victimes à agir contre leurs intérêts. Dans le domaine de la sécurité des informations, l'ingénierie sociale pousse les gens à divulguer des données privées en ligne, comme leurs identifiants de connexion ou leurs informations financières. Dans d'autres contextes, l'ingénierie sociale a une signification légèrement différente. Dans les sciences sociales, par exemple, l'ingénierie sociale se définit simplement comme l'effort visant à influencer psychologiquement les comportements sociaux à l'échelle d'un groupe. Il peut s'agir d'encourager la population à se comporter correctement dans les transports en commun, à arrêter de fumer, voire à soutenir une révolution politique. Nous nous concentrerons ici sur l'ingénierie sociale dans le contexte de la sécurité des informations, où l'ingénierie sociale peut être définie comme un cybercrime.

Types d'attaques par ingénierie sociale

L'une des meilleures façons de se protéger contre une attaque par ingénierie sociale est de se familiariser avec les méthodes courantes utilisées dans ce domaine. De nos jours,



l'ingénierie sociale est fréquente en ligne, même par le biais d'escroqueries sur les réseaux sociaux, où les malfaiteurs se font passer pour un contact de confiance ou une figure d'autorité afin de manipuler les gens pour qu'ils divulguent des informations confidentielles.

Phishing (hameçonnage)

Les communications sont maquillées pour sembler provenir d'une source fiable. Ces messages, souvent des e-mails, sont conçus pour inciter les victimes à fournir leurs informations personnelles ou financières. Après tout, pourquoi douter de l'authenticité d'un e-mail qui a été envoyé par un ami, un membre la famille ou un contact professionnel ?

Phishing ciblé

Le phishing ciblé est un type d'attaque par ingénierie sociale qui cible les grandes entreprises ou des individus spécifiques. Les attaques de phishing ciblé visent très précisément de petits groupes ou des personnes puissantes, comme des chefs d'entreprise et des célébrités

Vishing (hameçonnage vocal)

Une forme plus sophistiquée de phishing. Dans ce type d'attaque, un numéro de téléphone est généralement usurpé pour paraître légitime. Les pirates peuvent se faire passer pour des techniciens informatiques, des collègues ou des banquiers.

Smishing (hameçonnage par SMS)

Prend la forme de messages texte, ou SMS. Ces attaques poussent généralement la victime à effectuer rapidement une action et comportent un lien malveillant ou un numéro de téléphone à appeler. Les attaques de smishing véhiculent souvent un sentiment d'urgence pour inciter les victimes à agir vite et à se laisser prendre au piège.

Scareware (alarmiciel)

Un type de malware qui utilise l'ingénierie sociale pour inciter les gens à télécharger un faux logiciel de sécurité ou à visiter un site infecté par un malware. Les scarewares apparaissent généralement sous la forme de fenêtres pop-up prétendant vous aider à supprimer un virus informatique supposément détecté sur votre appareil. Une fois que vous cliquez sur la fenêtre, vous êtes redirigé vers un site malveillant ou vous installez sans le savoir encore plus de malwares.

Pretexting (usurpation d'identité)

Le pretexting consiste à créer un faux

scénario, ou « prétexte » pour tromper les victimes. Les attaques par pretexting peuvent se produire en ligne ou hors ligne, et font partie des astuces les plus efficaces de l'ingénierie sociale ; les pirates mènent des recherches exhaustives pour se faire passer pour des interlocuteurs authentiques.

Piège à miel

Un type d'ingénierie sociale dans lequel un pirate attire une victime dans une situation sexuelle délicate. Le malfaiteur utilise alors la situation comme une opportunité de sextortion ou de tout autre chantage. Les pirates exploitant l'ingénierie sociale tendent souvent des pièges en envoyant des e-mails de spam dans lesquels ils prétendent vous avoir « observé via votre webcam » ou par un autre moyen tout aussi sinistre.

Le spam par e-mail

L'une des formes les plus anciennes responsable de la majorité des messages indésirables qui encombrent votre boîte de réception. Dans le meilleur des cas, le spam par e-mail est simplement irritant, mais dans le pire des cas, ce n'est pas juste du spam, mais une arnaque visant à obtenir des informations personnelles.

Comment se préserver de l'ingénierie sociale

Le meilleur moyen de se protéger de ces attaques est de savoir les repérer. Une fois que vous êtes pris dans une attaque d'ingénierie sociale, il peut être difficile de s'en sortir. Heureusement, pas besoin d'être expert pour mettre en place une bonne prévention de l'ingénierie sociale : un peu d'intuition et de bon sens suffisent.

Vérifiez les sources

Si vous recevez un e-mail, un SMS ou un appel téléphonique d'une source inconnue, saisissez-le dans un moteur de recherche et voyez ce qui en ressort. S'il s'agit d'une attaque par ingénierie sociale connue, l'expéditeur peut avoir été signalé auparavant. Même si l'expéditeur semble tout à fait digne de confiance, vérifiez quand même, l'adresse e-mail ou le numéro de téléphone pouvant être légèrement différents de la véritable source et en lien avec un site web frauduleux.

Si c'est trop beau pour être vrai, ce n'est probablement pas vrai

Un esprit critique minimal est l'un des meilleurs moyens d'éviter les attaques par ingénierie sociale. Des attaques récentes par ingénierie sociale menées sur Twitter ont impliqué des célébrités telles qu'Elon Musk et Bill Gates qui feraient des dons de plusieurs milliers de dollars en bitcoins... si leurs followers leur donnaient seulement 1 000 dollars. Si la promesse de célébrités de donner des milliers de dollars en bitcoins semble trop belle pour être vraie, c'est certainement le cas. Dans ce genre d'attaque par ingénierie sociale, l'intuition et le bon sens peuvent être d'une grande aide. Méfiez-vous des offres qui vous font miroiter des cadeaux luxueux pour une fraction de leur valeur.

Restez protégé à tout moment avec **Avast One.**

Avast One offre une protection complète contre les liens suspects, les malwares, les violations de données, etc. Protégez l'ensemble de vos appareils et de vos données, bloquez les malwares et évitez les liens malveillants des spécialistes du phishing grâce à **Avast One.**

Téléchargez **Avast One Essentiel** gratuitement sur **avast.com/sciences**

Avast One

Un antivirus gratuit primé et une solution de protection avancée

+ Des outils de nettoyage pour améliorer les performances

+ Un VPN pour plus de confidentialité

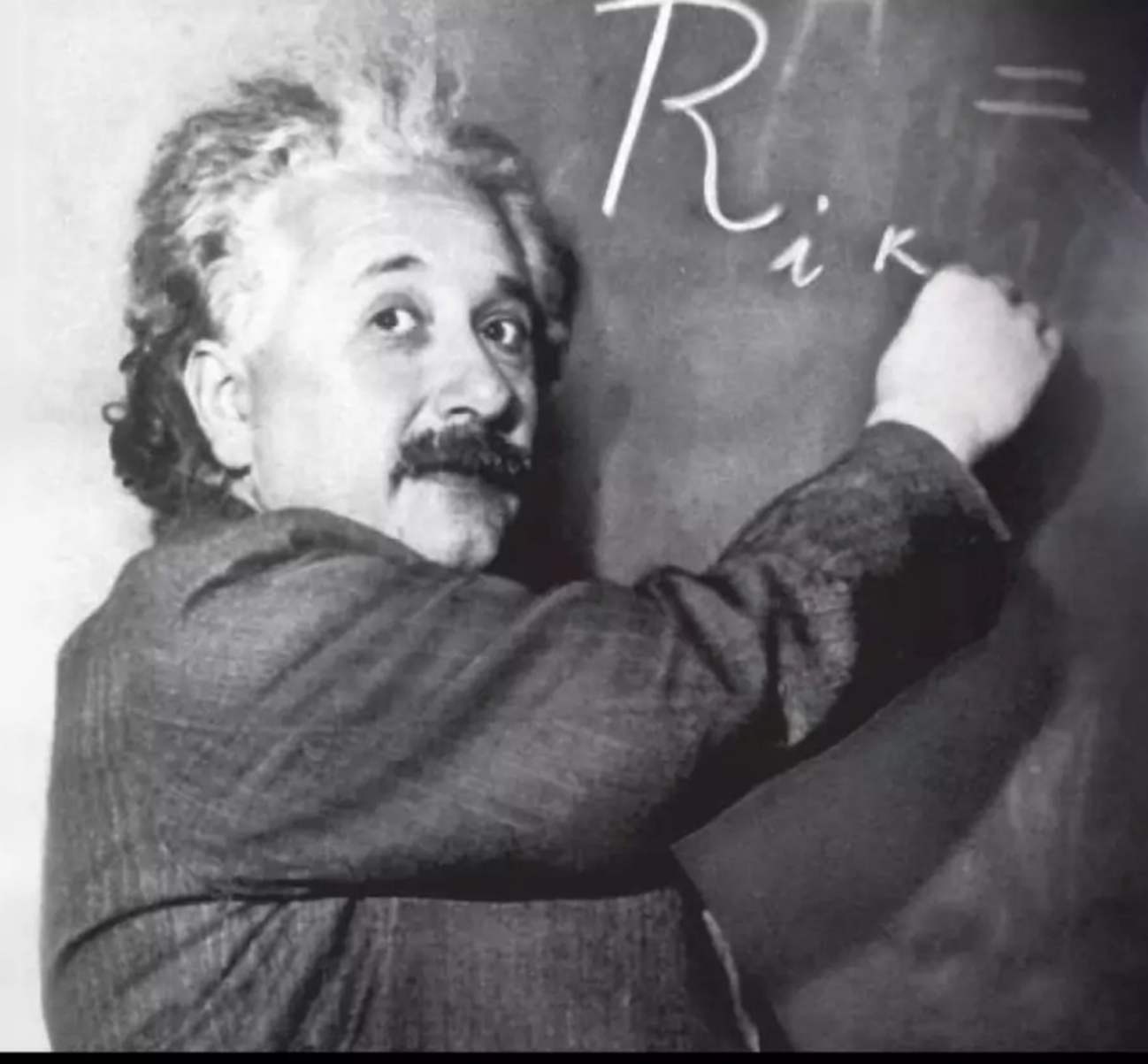
PACK TOUT-EN-UN

Et n'oubliez pas de protéger votre smartphone.

Téléchargez gratuitement sur mobile

Télécharger dans l'App Store

DISPONIBLE SUR Google Play



EINSTEIN
ET LA RELATIVITÉ

•

NEWTON
ET LA GRAVITATION

•

PLANCK
ET LA PHYSIQUE QUANTIQUE...

GRANDES IDÉES DE LA SCIENCE

Une collection exceptionnelle pour découvrir et comprendre les grandes théories scientifiques qui ont expliqué le monde

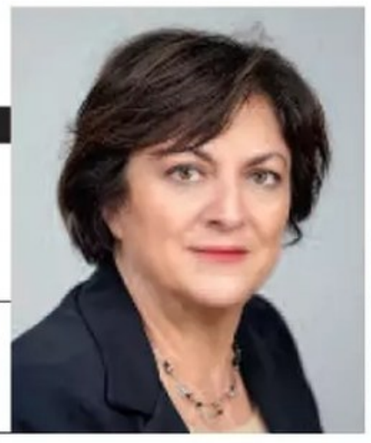
- Plongez dans la vie et l'époque des génies de la science
- Une nouvelle façon de parler de science : vivante, accessible et rigoureuse
- Un comité scientifique réunissant les plus grands experts internationaux dont deux prix Nobel

LE VOLUME 1
3,99 €
SEULEMENT !

RBA

ABONNEZ-VOUS DÈS MAINTENANT SUR www.collectionscience.fr
LE VOLUME 1 DÈS LE 27/12 CHEZ VOTRE MARCHAND DE JOURNAUX

Dominique Leglu
Directrice éditoriale



BERNARD MARTINEZ

Défi pharaonique

C'est un plaisir rare, celui d'aller à votre rencontre, chers lectrices et lecteurs, et de partager des moments précieux. Ce fut le cas en novembre 2023, où près de 70 d'entre vous ont accompli une « Croisière sur le Nil », en compagnie de deux scientifiques éminents, amis de *Sciences et Avenir–La Recherche*, l'égyptologue Pascal Vernus et le géo-historien Christian Grataloup. Ils ont donné à leurs compagnons de navigation l'occasion de six conférences éclairantes sur l'Égypte d'hier — Ramsès II, Toutankhamon, Hatchepsout… — et celle d'aujourd'hui, confrontée au changement climatique.

Finances, finances ! De fait, c'est un dialogue exclusif avec la ministre égyptienne de l'Environnement Yasmine Fouad, organisé par notre magazine, qui a donné au Caire le top départ de ces rencontres. À quelques jours seulement de la COP28, achevée le 12 décembre à Dubai, celle qui a présidé la COP27 à Charm-el-Cheikh en 2022 a dévoilé sa nouvelle implication dans les questions financières au cœur de toutes les discussions sur le changement climatique. De quoi aiguiser l'attention de son auditoire français !

Pertes et dommages. Une évidence pour cette ministre d'un pays de 110 millions d'habitants ? L'obligation d'aller au-delà du fonds de 100 milliards de dollars par an (chiffre désormais atteint, selon l'OCDE) que les pays développés versent à ceux en développement pour qu'ils puissent s'adapter. « *Il faut des trillions* [milliers de milliards] », dit-elle. Demain, ce seront les « *pertes et dommages* » causés par le dérèglement climatique qu'il faudra en effet assumer.

Grands travaux. Les défis auxquels un pays comme l'Égypte — et tant d'autres — est aujourd'hui confronté, sautent aux yeux. « Eau, nourriture, énergie », tout est à (re)penser. Systématiquement recycler les eaux usées — ce dont on parle aujourd'hui en France ! — désaliniser l'eau de la Méditerranée, gérer plastique et déchets, augmenter la part des renouvelables — « *42 % dès 2030, cinq ans plus tôt que prévu il y a encore un an* », promet Yasmine Fouad. Et engager de grands travaux : « *Nous avons construit 16 nouvelles villes.* »

Un delta vulnérable. Avec la montée du niveau des mers, le delta du Nil, où vit la moitié de la population du pays, est en effet menacé. C'est l'un des deltas les plus vulnérables dans le monde, souligne le Giec. Il faut imaginer les millions de gens à déplacer. Sans négliger de désengorger l'agglomération du Caire, dont les niveaux de pollution sont plus de dix fois supérieurs aux recommandations de l'OMS.

Montgolfières et bateaux. Pendant ce temps, les hauts lieux érigés par les dynasties pharaoniques ne cessent d'attirer les millions de touristes (8 % du PIB). Vols en montgolfières au-dessus de la vallée des Rois, son et lumière à Karnak, centaines de bateaux sur le Nil… Comment préserver aussi la nature, ses martins-pêcheurs, hérons et canards… qui continuent de frayer dans les roseaux, à la grande joie des voyageurs ? Les défis du XXIe siècle sont pharaoniques. ■

COURRIER

« Hubert Reeves : un conteur d'étoiles disparaît »
(*Sciences et Avenir-La Recherche* n° 922, décembre 2023)

Courriels à : **courrier-lecteurs@sciencesetavenir.fr**

« J'ai lu avec beaucoup d'intérêt les pages que vous consacrez à Hubert Reeves qui m'a fait découvrir et aimer le cosmos d'où mon abonnement à votre revue. Je remercie votre rédaction pour ce bel hommage rendu à un très grand homme. » **Gérald Delaunay**

Méga-étoile

Dans votre dossier sur les astres les plus intrigants (*S. et A.* n° 922), vous dites : « *La plus grande de toutes les étoiles a un rayon de 2150 fois celui du Soleil* » et à la ligne suivante : « *Si elle était placée au centre du Système solaire, elle s'étendrait au-delà de l'orbite de Saturne.* » Pouvez-vous expliciter le calcul ?

Émile Languille

S. et A. : Le rayon de l'étoile est de 2150 fois celui du Soleil, soit environ 696 342 kilomètres multiplié par 2150, ce qui nous donne environ 1,497 milliard de kilomètres et on retombe (si on peut dire) donc bien sur l'orbite de Saturne.

Source de protéines

Dans votre dossier sur l'alimentation (*S. et A.* n° 921), vous écrivez qu'il ne faut pas manger plus de 500 g de viande par semaine, soit 70 g par jour. On apprend que cela correspond à 14 g de protéines. Une personne comme moi doit en manger 70 g par jour dont 56 g seront apportés par les autres aliments, ce qui va de 650 g de haricots à 1920 g de riz, ou 1400 g de pâtes. Je ne m'imagine pas manger des quantités pareilles !

Charles-Henri Jourdain

S. et A. : En effet, si les lentilles sont riches en protéines, elles le sont bien moins qu'un peu de poisson ou un œuf. C'est pourquoi les scientifiques recommandent d'ajouter une source de protéines aux repas traditionnellement moins riches en protéines. Pour le petit déjeuner, ajouter une tranche de jambon, un œuf ou un yaourt grec. Pour le dîner, compléter la soupe par un peu de poulet ou du poisson.

Bilan carbone

Un passage de l'article sur l'empreinte carbone, face cachée de l'IA (*S. et A.* n° 920) m'a interpelé : « *pour la fabrication et le déploiement du programme de l'IA, le bilan monte à 50,5 tonnes à comparer aux 49,43 tonnes de 60 vols Londres-New York* ». S'agit-il de 60 vols d'avion ou de 60 vols pour un passager, ce qui est moins spectaculaire ?

Vincent Robert

S. et A. : Ces résultats viennent du calculateur en ligne CarbonFootprint qui se base bien sur une occupation moyenne d'un avion sur un trajet. Donc 60 vols d'avion. La méthodologie est expliquée ici : sciav.fr/923carbon

Précision Dans la petite carte illustrant l'article « L'héritage artistique de l'empire carolingien » (*S. et A.* n° 920), nous avons inclus par erreur la Bretagne à la Francie occidentale, alors que le duché ne sera définitivement rattaché au Royaume de France qu'en 1532.

La science, CQFD.
Natacha Triou
DU LUNDI AU JEUDI
16H – 17H
> Disponible sur le site et l'appli Radio France.

© Radio France/Ch. Abramowitz
En partenariat avec
SCIENCES ET AVENIR La Recherche
france culture
L'esprit d'ouverture

BERNARD MARTINEZ

ÉDITO

Mathieu Nowak
Rédacteur en chef

Une autre histoire

C'est un fragment de papyrus d'à peine quelques centimètres carrés. Qui plus est découvert il y a plus d'un siècle. Rien de très significatif à première vue. Jusqu'à ce qu'il passe sous la loupe des scientifiques en 2023. Et qu'il devienne alors un prétendant au plus ancien fragment d'évangile connu. Si sa datation et son contenu venaient à être confirmés, ce serait une « *petite bombe* », selon les mots de Michael Langlois, historien et philologue spécialiste des manuscrits bibliques à l'université de Strasbourg. De quoi peut-être revoir le socle sur lequel s'appuie la religion chrétienne : est-ce que les quatre évangiles dits canoniques, les seuls qui font foi depuis le concile de Trente en 1546, n'ont pas éclipsé d'autres textes relatifs à la vie du Christ, antérieurs et donc non moins légitimes ? C'est la première grande enquête que vous propose *Sciences et Avenir–La Recherche* ce mois-ci. La deuxième nous a été inspirée par une autre « bombe », météorologique cette fois. En octobre dernier, en à peine 24 heures, des vents sont passés de 85 à 260 km/h pour former un ouragan qui a dévasté la ville d'Acapulco, au Mexique. Le million d'habitants a été totalement pris au dépourvu, le phénomène ayant totalement échappé aux modèles de prévision météorologique. Trois jours plus tard, c'est la France qui était touchée par la tempête Ciaran. En Bretagne, les records de vent sont tombés comme les arbres. Plus tôt dans l'année, la terre a tremblé au Maroc, en Turquie et en Syrie. Un séisme a aussi été enregistré le 23 novembre dans la région de Naples, en Italie. Si son ampleur fut bien plus modeste — avec une magnitude de 3,1 —, il pourrait signer le réveil d'un supervolcan dont l'éruption pourrait affecter toute l'Europe. Les scientifiques sonnent l'alerte. ■

> « Si la datation du fragment de papyrus apocryphe venait à être confirmée, ce serait une « petite bombe » dans l'historiographie biblique, nous dit un spécialiste de cette période »

SCIENCES ET AVENIR La Recherche

SERVICE ABONNEMENT
et anciens numéros
Tél. : 01.55.56.71.48
Sciences et Avenir 45, avenue du Général-Leclerc 60643 Chantilly cedex
abonnements@sciencesetavenir.fr

Tarif des abonnements : France, 1 an simple (11 numéros dont un double) : 35 € 1 an complet (11 numéros dont un double + 4 hors-séries) : 48 €. Étranger : nous consulter.
Abonnements Belgique : Edigroup : tél. 00.32.70.233. 304
Abonnements Suisse : Edigroup : tél. 00.41.22.860.84.01

Pour joindre la rédaction :
41 bis, avenue Bosquet 75007 Paris
Tél. : 01.55.35.56.01.
E-mail : redaction@sciencesetavenir.fr
Site Internet : sciencesetavenir.fr

Directrice éditoriale Dominique LEGLU - 01.55.35.56.02
Rédacteur en chef Sciences et Avenir Mathieu NOWAK 01.55.35.56.38
Rédacteur en chef La Recherche Philippe PAJOT - 01.70.98.19.29
Rédacteur en chef digital Olivier LASCAR - 01.55.35.56.15

Rédaction en chef hors-série Vincent REA - 01.55.35.56.35 avec Florence LEROY - 01. 55.35.56.36
Adjoint à la rédaction en chef
Laurent PERICONE (édition) - 01.55.35.56.10
Rédacteur(trice)s en chef adjoint(e)s
Vincent GLAVIEUX (La Recherche) - 01.70.98.19.32
Hugo JALINIÈRE (Sciences et Avenir) - 01.55.35.56.52
Andreina DE BEI (photo) - 01.55.35.56.31
Lise LOUMÉ (digital) - 01.55.35.56.39
Directeur(trice)s artistiques
Dominique PASQUET (couverture) - 01.55.35.56.59
Jean-Louis GILABERT - 01.55.35.56.28
Thalia STANLEY (adjointe) - 01.55.35.56.21
Secrétaire générale de la rédaction
Véronique MESSAGER - 01.55.35.56.18
Conseillère auprès de la rédaction en chef
Rachel MULOT (cheffe de service enquêtes) - 01.55.35.56.07
Chef de service Fabrice NICOT (fondamental) - 01.55.35.56.46
Chef de service adjoint Hervé RATEL (actualités) - 01.55.35.56.45
Chef(fe)s de rubrique
Franck DANINOS (fondamental) - 01.55.35.56.78
Mathias GERMAIN (biologie, médecine, santé) - 01.70.98.19.33
Sylvie RIOU-MILLIOT (médecine, santé) - 01.55.35.56.54
Rédaction Marine BENOIT (archéologie, histoire) - 01.55.35.56.23
Arnaud DEVILLARD (numérique, expositions) - 01.55.35.56.27
Sylvie ROUAT (grand reporteure, espace, océanologie) - 01.55.35.56.40
Assistante de direction Valérie PELLETIER - 01.55.35.56.01
Collaborateurs(trices) Bernadette ARNAUD, Sylvie BOISTARD, Loïc CHAUVEAU, Johan KIEKEN
Chroniqueurs Sylvie BENZONI, Christophe CASSOU, Jean-Gabriel GANASCIA, Céline GUIVARCH, CLAIRE MATHIEU
Ont participé à ce numéro P. BERLOQUIN, S. CARON, N. GUTIERREZ C., P. KALDY, E. LECOMTE, L. MORA, M. PARRA
1re secrétaire de rédaction Sandrine HAGÈGE - 01.55.35.56.17
Photo-iconographie Isabelle TIRANT - 01.55.35.56.32
Claire BALLADUR - 01.70.98.19.41
Pôle digital Sarah BOULVARD (journaliste vidéaste en alternance) - 01.55.35.56.51, Valentin COLLIAT-DANGUS (community manager) - 01.55.35.56.70, Isabelle DO O'GOMES (cheffe de rubrique, veille) - 01.55.35.56.49, Camille GAUBERT (santé) - 01.55.35.56.24,
Joël IGNASSE (espace, paléontologie) - 01.55.35.56.15,
Coralie LEMKE (santé) - 01.55.35.56.56, Astrid SAINT AUGUSTE (rédactrice spécialisée) - 01.55.35.56.48, Anne-Sophie TASSART (cheffe de rubrique) - 01.55.35.56.41
Jessica RIOS responsable projets digitaux -
Yann BOURDAIS chef de projet junior - Flora ISSINGUI cheffe de projet marketing digital
Courrier des lecteurs
Sara DE LACERDA - courrier-lecteurs@sciencesetavenir.fr
Informatique Daniel DE LA REBERDIÈRE - 01.55.35.56.06
Responsable administrative et financière Jaye REIG - jreig@challenges.fr
Comptabilité - compta@challenges.fr
Responsable ressources humaines William AFTHONIADES - wafthoniades@challenges.fr
Responsable paye Sandrine MARTIN - smartin@challenges.fr
Fabrication Sarah RABBAH
Publicité MediaObs 44, rue Notre-Dame-des-Victoires 75002 Paris Tél. : 01.44.88.97.70. Fax : 01.44.88.97.79.
Courriel : l'initiale du prénom puis nom suivi de @mediaobs.com
Directrice générale Corinne ROUGÉ - 01.44.88.93.70 - assistée de Marie-Noëlle MAGGI - 01.44.88.93.70
Directeur de publicité Emmanuel LALA - 01.44.88.89.28
Exécution : Emilien RIGNOLS - 01.44.88.89.05
Administration des ventes Catherine FERNANDES - 01.44.88.89.20
Directeur commercial Valéry SOURIEAU
Directeur des abonnements Luc BONARDI
Responsable des abonnements Lina QUACH - 01.55.35.56.63

Les Éditions Croque Futur
Président, directeur de la publication Claude PERDRIEL
Directeur général Philippe MENAT
Directeur éditorial Maurice SZAFRAN
Secrétaire général Jean-Claude ROSSIGNOL

Origine du papier : Allemagne - Taux de fibres recyclées : 0 %
Eutrophisation : PTot = 0,018 kg/tonne de papier
Ce magazine est imprimé chez Roto France (Lognes), certifié PEFC

Certifié PEFC
Ce produit est issu de forêts gérées durablement et de sources contrôlées.
PEFC 10-31-1557 pefc-france.org
FR
ACPM DIFFUSION

Les noms et adresses de nos abonnés seront communiqués aux organismes liés contractuellement avec *Sciences et Avenir*, sauf opposition. Dans ce cas, la communication sera limitée au service de l'abonnement. Ce numéro comporte une lettre de « bienvenue aux abonnés » et le message « L'Histoire » jetés sur couverture sur une partie de la diffusion abonnés.
Commission paritaire n° 0625 K 79712.
ISSN 00368636. Distribué par MLP.

Transmettre l'espoir de vaincre le cancer

Léguez à l'Institut Curie, 1er Centre français de recherche en cancérologie

Transmettre tout ou une partie de ses biens à l'Institut Curie, premier centre français de recherche en cancérologie, est un formidable message d'espoir pour tous ceux qui luttent contre le cancer.

En soutenant les efforts de l'Institut Curie, fondé par Marie Curie, vous effectuez un geste de générosité envers les générations futures, vous donnez aux chercheurs et médecins les moyens de prendre le cancer de vitesse et associez votre nom à ce combat pour la vie.

institut Curie

ENSEMBLE, PRENONS
LE CANCER DE VITESSE

LEGS - DONATIONS - ASSURANCES-VIE

curie.fr

Pour tout renseignement contacter Catherine Ricatte - Institut Curie :
26, rue d'Ulm - 75248 Paris Cedex 05 - 01 56 24 55 34 - catherine.ricatte@curie.fr

institut Curie

BULLETIN DE DEMANDE D'INFORMATION à compléter à retourner sous enveloppe à l'adresse ci-dessus.

☐ Je désire recevoir votre documentation sur les legs, donations et assurances-vie en faveur de l'Institut Curie.

☐ Je souhaite être contacté en toute confidentialité par votre responsable legs, donations et assurances-vie.

Vous pouvez me joindre au numéro ci-contre ▶

☐ Mme ☐ M. Nom : .....

Prénom : .....

Adresse : .....

Code postal : |_|_|_|_|_|

Ville : .....

Tél. : |_|_| |_|_| |_|_| |_|_| |_|_|

S&A0124

SOMMAIRE

Sciences et Avenir - La Recherche / N° 923 / Janvier 2024

DOSSIER P. 30

Les colères de la Terre

Tsunamis, ouragans, supervolcans, séismes... Les catastrophes ont frappé durement notre planète par le passé et jusqu'à récemment. Les scientifiques s'emploient à mieux comprendre ces phénomènes et les localiser afin de prévenir les drames humains.

P. 54

Pêche : l'urgence d'adopter des pratiques durables

La diversité de la flotte de pêche française rend impossible une conversion globale à des moteurs plus verts. Des initiatives émergent cependant, comme celle du retour à l'usage de la voile.

P. 64

Thyroïde : chasse aux traitements inutiles

Les dysfonctionnements de la glande thyroïdienne entraînent très souvent des examens et traitements qui pourraient être réduits et mieux adaptés. Aujourd'hui, l'heure est à la désescalade.

P. 78

L'évangile oublié qui bouleverse la Bible

Daté de la première moitié du IIe siècle, un fragment de papyrus secoue le milieu de l'historiographie biblique. Il pourrait s'agir du plus ancien extrait d'évangile.

5 **Éditorial** par Dominique Leglu

6 **Courrier**

7 **Édito** par Mathieu Nowak

ÉVÉNEMENT

10 **Les 10 découvertes de 2023**

SCIENCES FONDAMENTALES

14 **ACTUALITÉS** Une explosion cosmique a perturbé notre atmosphère / Des électrons dans un piège de cristal

48 **Drone : une arme inédite sur le champ de bataille**

52 **Le journal de l'IA : La ruée sur les données ne fait que commencer**

NATURE

18 **ACTUALITÉS** L'IA s'attaque à la prévision météo / Les étoiles de mer ont plusieurs têtes

54 **Pêche : l'urgence d'adopter des pratiques durables**

60 **L'étonnant retour à la vie après la fonte des glaciers**

SANTÉ

22 **ACTUALITÉS** Première greffe d'un œil complet / Une thérapie issue de CRISPR-Cas9 autorisée

64 **Thyroïde : alerte aux traitements inutiles**

69 **Un implant aide à marcher avec Parkinson**

72 **Nutrition : le poisson, à consommer sous conditions**

HISTOIRE

26 **ACTUALITÉS** Certains dinosaures creusaient des terriers / Le visage de Ramsès II fidèlement reconstitué

78 **L'évangile oublié qui bouleverse la Bible**

86 **Dans la tête de Marion Montaigne**

TRANSVERSALES

90 **Sélection livres**

92 **Expositions**

93 **Le ciel de janvier**

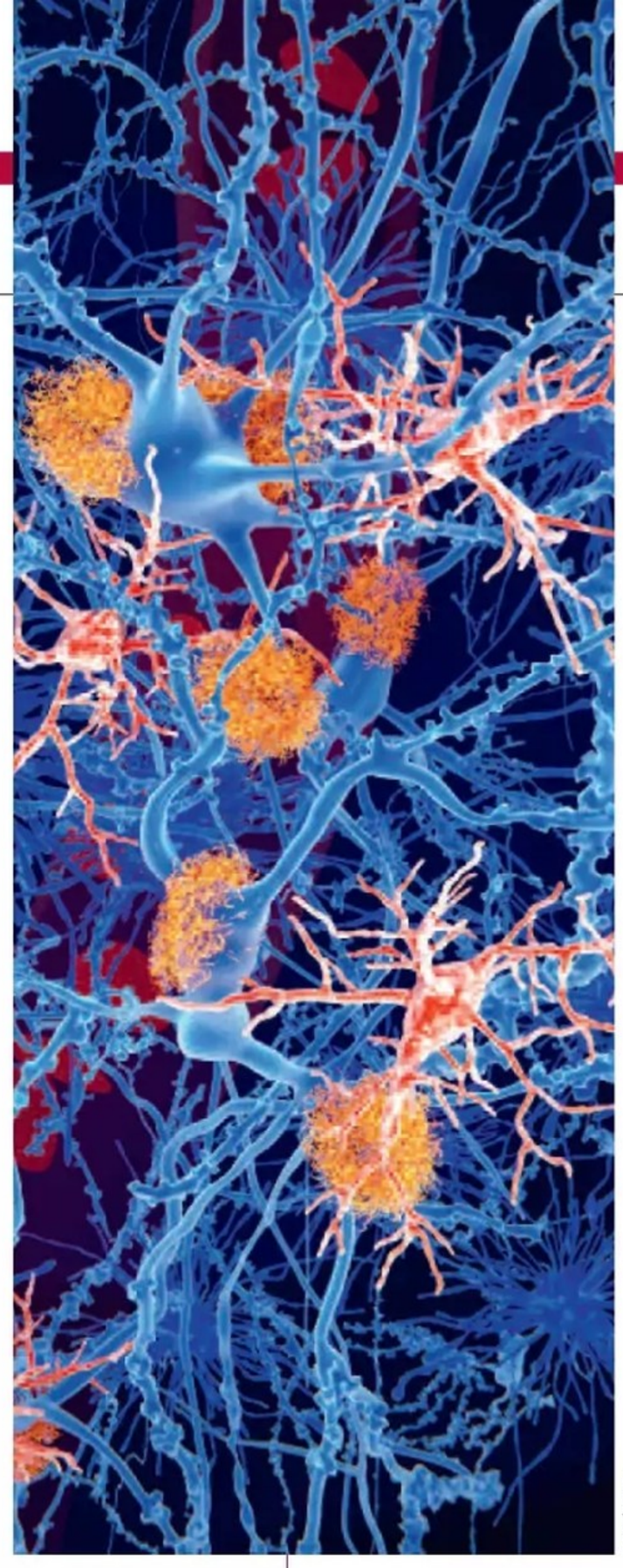
94 **Chroniques**
Climat par Céline Guivarch et Christophe Cassou / Mathématiques par Sylvie Benzoni / Éthique par Jean-Gabriel Ganascia / L'œil d'Olivier Lascar

96 **Questions de lecteurs**

97 **Jeux**

MIGUEL MORENATTI/AP/SIPA - SIMON TOWNSLEY/PANOS-REA - EUMETSAT - FRÉDÉRIC LANCELOT / DIVERGENCE - AP-HM / CHRISTOPHE ASSO - THE GREEN COLLECTION- ARDON BAR-HAMA

Les 10 découvertes de 2023



SPL/BSIP

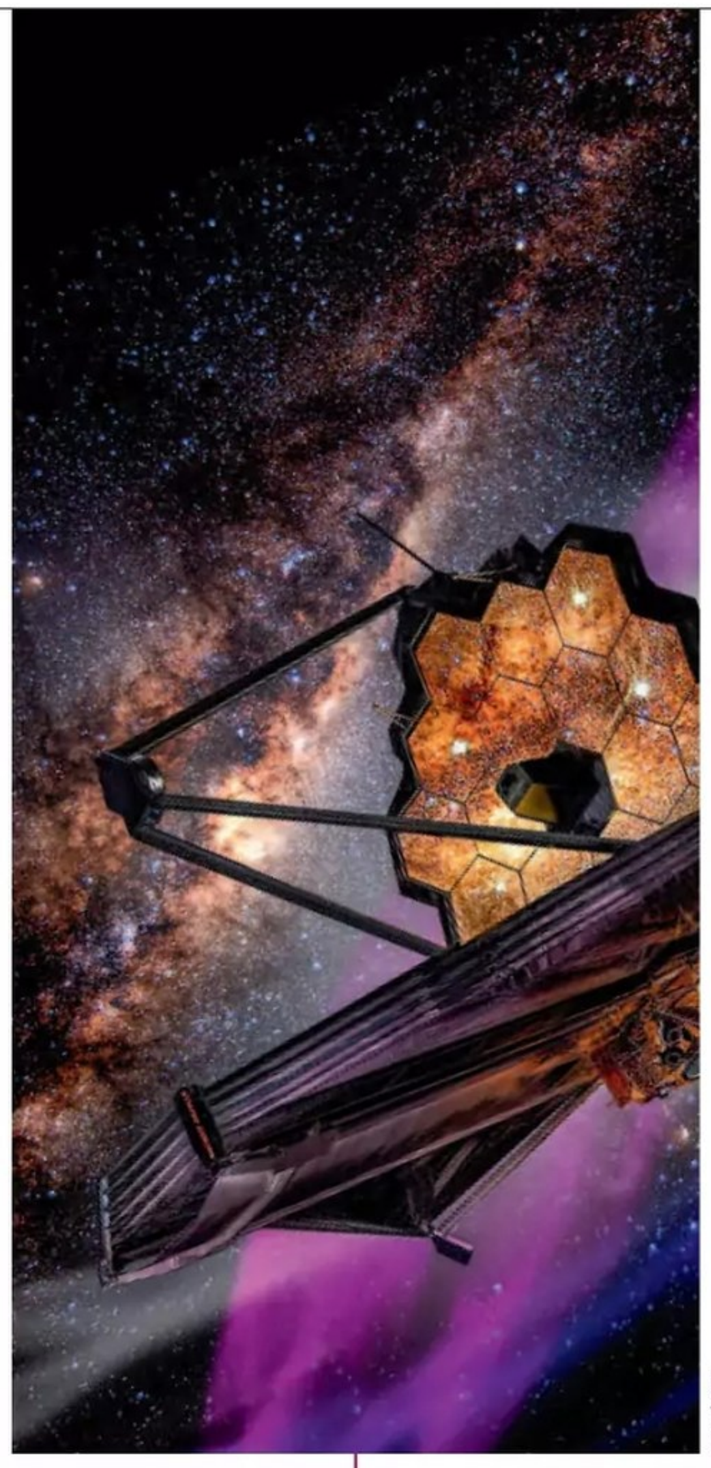
Des origines du cosmos aux entrailles de la Terre, en passant par le cerveau ou les plantes, l'année écoulée a été riche en découvertes scientifiques. Voici une sélection des plus belles parues dans « Sciences et Avenir-La Recherche ».

Par la rédaction

6 JANV.

RALENTISSEMENT DU DÉCLIN COGNITIF DANS LA MALADIE D'ALZHEIMER

Un traitement développé contre la maladie d'Alzheimer, le lecanemab, montre qu'il est possible de ralentir le déclin cognitif des patients en bloquant les lésions bêta-amyloïdes caractéristiques de cette pathologie dans le cerveau. Une première qui conduit la FDA, l'agence du médicament américaine, à autoriser cet anticorps monoclonal. Si l'effet du médicament reste modeste — 27 % de ralentissement du déclin cognitif —, il constitue une avancée importante sur le plan conceptuel.
S. et A. *n° 913, mars 2023 ;*
S. et A. *n° 919, septembre 2023.*



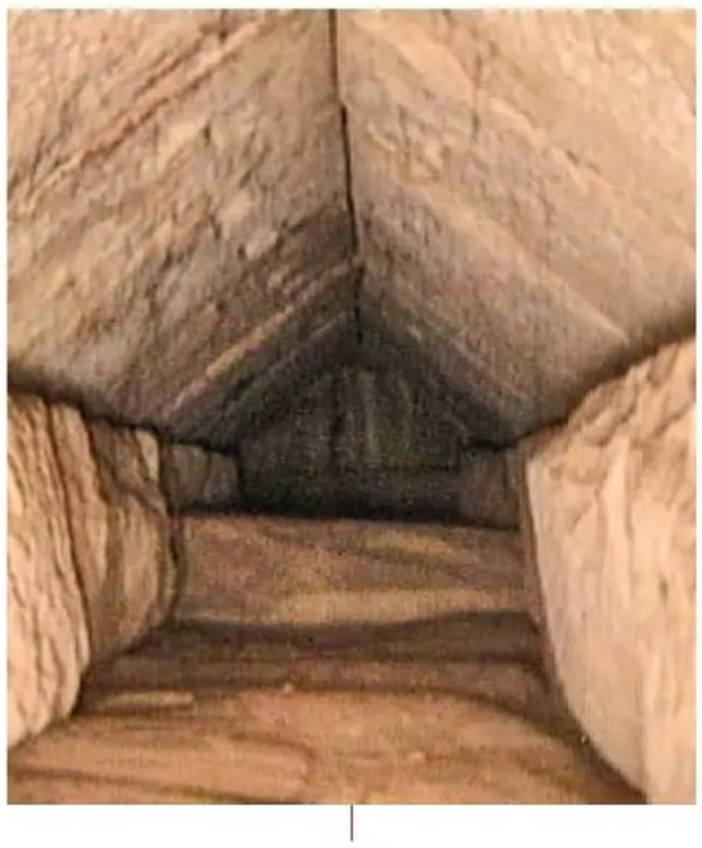
SPL/AFP

22 FÉV.

LA PREMIÈRE GRANDE DÉCOUVERTE DU JWST

Le télescope spatial James-Webb (JWST) fait l'observation de six galaxies situées moins de 500 millions d'années après le Big Bang, le record étant de 224 millions. Comment de telles concentrations de gaz, de poussières, d'étoiles et de matière noire ont-elles pu s'amasser si tôt dans l'Univers ? Les modèles actuels atteignent leurs limites pour y répondre. Les astrophysiciens s'apprêtent donc à réécrire en partie l'histoire de l'Univers en les modifiant à l'aide des données sur la composition de ces bébés galaxies.

S. et A. *n° 916, juin 2023.*



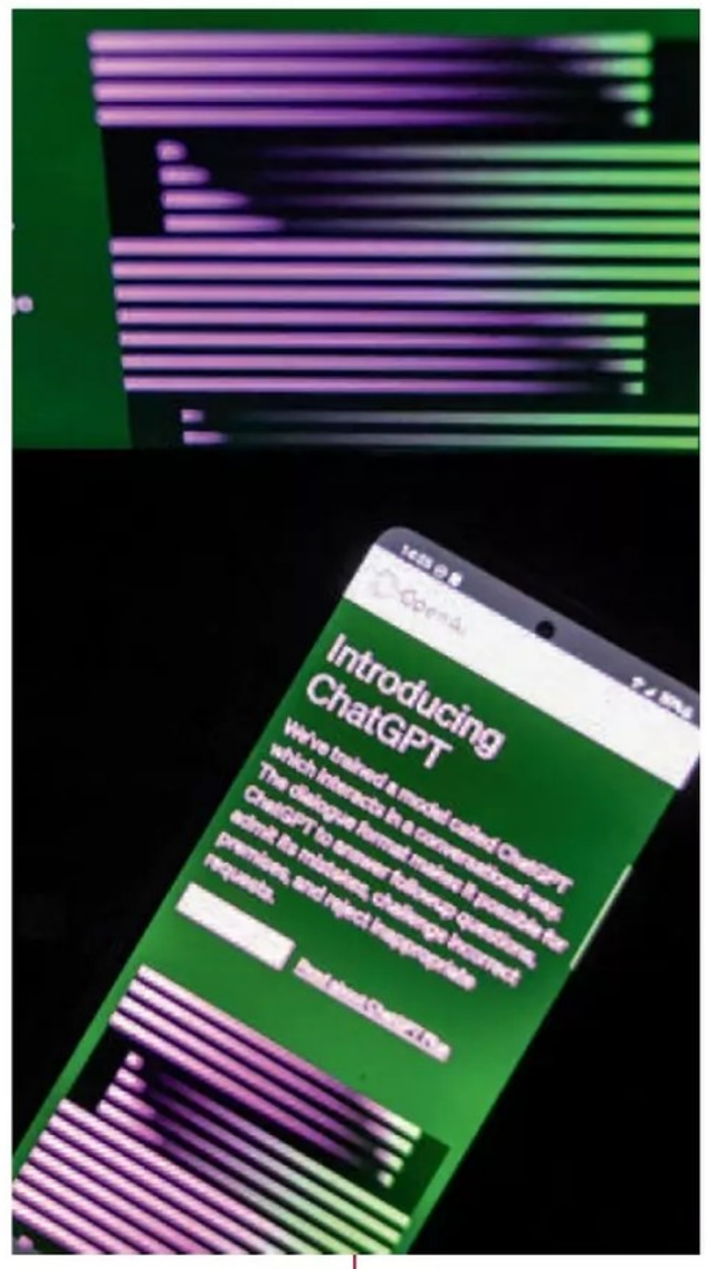
REUTERS

2 MARS

UN COULOIR SECRET DANS LA PYRAMIDE DE KHEOPS

Le ministère égyptien du Tourisme et des Antiquités annonce la découverte d'un passage caché dans la Grande Pyramide de Kheops. Ce couloir de 9 m de long sur 2 m de large a été révélé par la campagne ScanPyramids, qui recherche depuis 2015 des vides inconnus dans la structure. Selon Zahi Hawass, directeur du comité scientifique du projet, il est *« fort possible qu'il protège la véritable chambre funéraire du roi Kheops »*.

S. et A. *n° 914, avril 2023.*



SIPA

22 MARS

ALERTE AUX DANGERS DE L'IA

L'explosion des usages liés à l'intelligence artificielle (IA) (ChatGPT, Dall-E, Bard…), conduit des centaines d'experts à s'alarmer des *« graves risques »* que celle-ci fait peser *« sur les sociétés et l'humanité »*. Parmi les 33 000 signataires de l'appel à un moratoire sur le développement de ces outils, figurent le cofondateur d'Apple, des membres du laboratoire d'IA de Google, des ingénieurs de Microsoft et nombre de chercheurs… Sans effet. Elon Musk, signataire lui aussi, lance même dans la foulée sa propre entreprise d'IA, X.AI.

MAXPPP

L. ANDERSON, US ANTARCTIC PROGRAM & IODP JRSO

F. GOUSSARD ET R. ALLAIN

30 MARS — AVRIL — 13 JUIN

LES PLANTES CRIENT QUAND ELLES SONT STRESSÉES

Pour la première fois, des chercheurs ont enregistré et analysé des sons émis distinctement par des plantes. Sur des plants de tomates et de tabac placés dans des caissons acoustiques, les microphones à ultrasons de l'équipe de l'université de Tel-Aviv (Israël) révèlent que ces végétaux produisent des vibrations à des fréquences comprises entre 20 et 100 kHz lorsqu'ils sont en état de stress. Rendus audibles, ces ultrasons sont semblables à des cliquetis de pop-corn à la cuisson. Assoiffés, les plants de tomates produisaient 35 sons par heure quand les plants de tabac en émettaient 11.

S. et A. *n° 915, mai 2023.*

PREMIÈRE PLONGÉE DANS LE MANTEAU DE LA TERRE

Lors d'une expédition menée au milieu de l'océan Atlantique Nord, le navire de forage *Joides Resolution* a récupéré près de 30 tonnes de roches provenant du manteau de la Terre, couche située entre sa croûte superficielle et son noyau en fusion. Elles ont été collectées en creusant un puits de 1267 m sous 800 m d'eau, au niveau d'une montagne sous-marine. C'est la première fois que des roches du manteau sont recueillies sans discontinuité à une telle profondeur, multipliant par six le précédent record. À la clé : une meilleure compréhension de la tectonique des plaques et des phénomènes magmatiques.

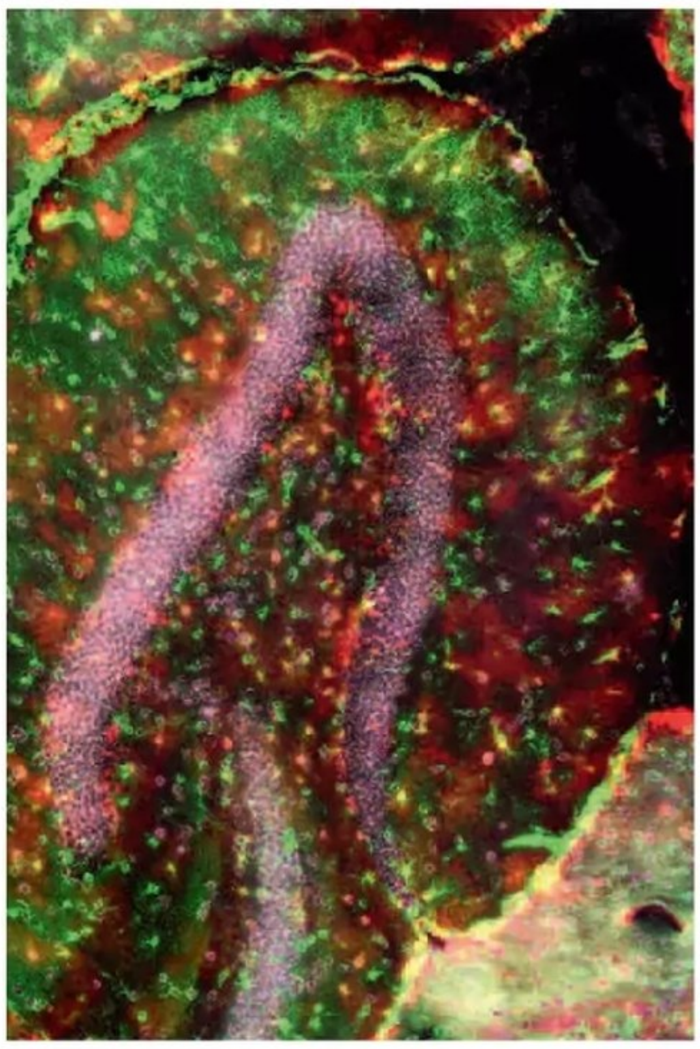
S. et A. *n° 921, novembre 2023.*

LA PREUVE D'UN DIMORPHISME SEXUEL CHEZ LES DINOSAURES

C'est une des stars du site paléontologique d'Angeac-Charente : l'ornithomimosaure, dont un troupeau d'une soixantaine d'individus a été retrouvé 140 millions d'années après leur mort. Ces animaux, à plumes, ont permis d'établir pour la première fois l'existence d'un dimorphisme sexuel chez des dinosaures. Ont été identifiés deux types de fémurs : un premier bien droit et un second courbé vers l'extérieur. Mais impossible de savoir qui est qui : chez les animaux vivants, ces attributs sont alternativement portés par les deux sexes, selon les espèces.

sciav.fr/923dimorph

Les 10 découvertes de 2023



TELLEY/VOLTERRA UNIL

SIPA

HAGAI PERETS

6 SEPT.

UN NOUVEAU TYPE DE CELLULES CÉRÉBRALES

À mi-chemin entre les neurones, excitables électriquement, et les cellules gliales assurant le soutien biologique et la protection des tissus nerveux, une équipe de l'université de Lausanne (Suisse) a identifié un type cellulaire hybride inédit. Sécrétant un neurotransmetteur essentiel — le glutamate — aussi efficacement que des neurones, ces cellules nommées astrocytes glutamatergiques joueraient un rôle essentiel dans les crises d'épilepsie et la mémoire. Une nouvelle piste de recherche dans les maladies neurologiques.
S. et A. *n° 921, novembre 2023.*

11 OCT.

ASTÉROÏDE BÉNOU : DES ÉCHANTILLONS PROMETTEURS

Après avoir voyagé sept ans dans l'espace et grappillé des morceaux de roches à la surface de l'astéroïde Bénou, à 150 millions de kilomètres de la Terre, la sonde de la Nasa Osiris-Rex a pu larguer sa précieuse cargaison dans le désert de l'Utah (États-Unis). Résultats : des milliers de grains et de fines poussières de couleur noire contenant d'importantes quantités d'eau et de molécules organiques, indiquent les premières analyses. Leur masse totale avoisine les 250 grammes. Ce qui représente, de très loin, le plus gros échantillon de matière astéroïdale collecté jusqu'à présent.
S. et A. *n° 921, novembre 2023.*

1er NOV.

DES VESTIGES DE THÉIA DANS LES ENTRAILLES DE LA TERRE

Les deux larges structures géologiques posées à 2900 km sous la surface de la Terre sont bien les vestiges de la gigantesque collision de notre future planète avec Théia, une autre protoplanète de la taille de Mars, il y a environ 4,5 milliards d'années. Posées au fond du manteau terrestre — la couche séparant le noyau de la Terre de sa croûte —, ces masses de la taille d'un continent chacune situées sous l'Afrique et l'océan Pacifique joueraient un rôle dans les remontées de magma vers la surface de la croûte terrestre.
sciav.fr/923theia

Le sursaut gamma GRB221009A a été capté par de nombreux instruments, dont des satellites chargés d'étudier ces phénomènes.

Une explosion cosmique a perturbé notre atmosphère

Un puissant flash de rayons gamma provenant peut-être d'une collision entre étoiles à neutrons très lointaines a illuminé la Terre durant 800 secondes, affolant appareils électroniques et satellites.

L'événement cataclysmique — une explosion d'étoile en supernova ou une collision d'étoiles à neutrons — s'est produit à plus de 2 milliards d'années-lumière de nous. Et pourtant, il avait encore assez d'énergie en arrivant sur Terre pour en perturber l'atmosphère. C'est l'étonnante conclusion d'une étude menée sur le sursaut gamma GRB221009A qui nous a frappés le 22 octobre 2022, *« probablement le plus puissant jamais observé »*, selon Mirko Piersanti, de l'université de L'Aquila (Italie), et auteur principal de l'article paru dans *Nature*. Ce flash de rayons gamma a illuminé la Terre durant 800 secondes (environ 13 minutes), déclenchant des détecteurs anti-incendie en Inde, et certains instruments chargés de repérer les éruptions solaires. Parmi eux, le satellite CSES, lancé en 2018 et issu d'une collaboration sino-italienne. Il surveille l'ionosphère, une couche située entre 50 et 1000 kilomètres d'altitude qui se compose en partie d'ions, des noyaux d'atomes chargés électriquement. Il était positionné, par chance, près de la zone « flashée » par le GRB (gamma ray-burst, sursaut gamma en français) et a ainsi pu en mesurer l'impact. L'étude montre que ce flash de rayons gamma *« a touché les couches les plus basses de l'ionosphère situées à seulement quelques dizaines de kilomètres au-dessus de la surface de notre planète, et laissé une empreinte comparable à celle d'une éruption solaire majeure »*, selon Laura Hayes, physicienne à l'Agence spatiale européenne.

Des conséquences graves si le flash avait été proche

Ce résultat a de quoi donner des sueurs froides à l'idée qu'une telle explosion pourrait se produire dans la Voie lactée, dont la taille n'est « que » de 50 000 années-lumière. Qu'adviendrait-il de la Terre prise dans un faisceau si proche ? Les résultats de CSES montrent que ce ne serait pas anodin. On pourrait craindre non seulement une perturbation majeure de l'ionosphère, mais surtout une disparition de la couche d'ozone qui nous protège des rayons ultraviolets, avec de graves conséquences pour la vie sur Terre. D'ailleurs l'hypothèse « sursaut gamma » a déjà été évoquée pour expliquer certaines grandes extinctions du passé. Néanmoins, *« il y a un grand débat sur les conséquences possibles d'un sursaut gamma dans notre propre galaxie »*, conclut prudemment Mirko Piersanti, car l'interaction entre l'atmosphère et les GRB est encore peu documentée. Heureusement, la probabilité que la Terre se trouve dans la ligne de mire étroite d'un GRB proche est très faible. C'est encore notre meilleure protection. Même si d'aucuns y voient tout de même une raison supplémentaire de s'inquiéter du futur de la Terre. **F. N.**

ESA/ATG EUROPE

Des électrons dans un piège de cristal

Grâce à une nouvelle technique, un matériau pourrait devenir supraconducteur avec une résistance électrique nulle.

Dans un matériau conducteur, les électrons se déplacent et interagissent de manière spécifique avec le réseau d'atomes qui les entoure. Leurs états énergétiques sont ainsi compris dans une certaine gamme plus ou moins large. Mais des physiciens du MIT (États-Unis) sont parvenus, pour la première fois, à réduire cette gamme à une valeur unique au sein d'un cristal 3D. Les électrons se trouvent alors piégés, comme « zombifiés » dans certains sites du réseau cristallin. Le secret réside dans la géométrie du solide : une structure tri-hexagonale, formée par un entrelacs d'hexagones et de triangles équilatéraux. Elle apparaît lorsque certains mélanges d'atomes sont chauffés à très haute température avant d'être refroidis. C'est le cas pour le cuivre et le nickel. Mais aussi pour le rhodium et le ruthénium. Dans ce cas, le matériau devient même supraconducteur avec une résistance électrique nulle. ■ **F. D.**

J. CHECKELSKY, RICCARDO COMIN, ET AL

La géométrie particulière du cristal, tissé d'hexagones et de triangles, a permis d'emprisonner les électrons.

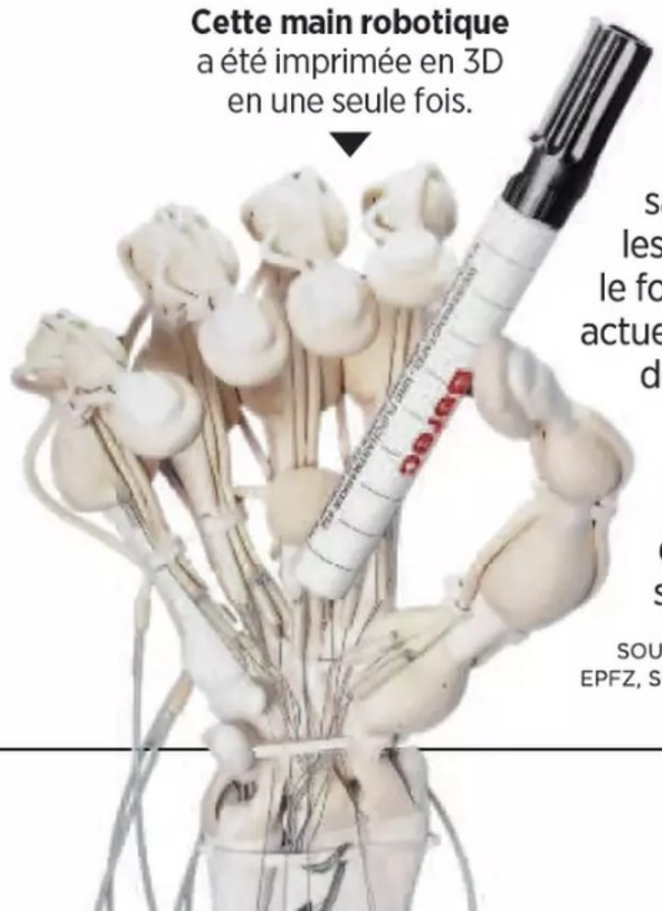
EN DEUX MOTS

INCIDENT Deux astronautes ont laissé échapper une boîte à outils lors d'une sortie pour une opération de maintenance sur la Station spatiale internationale. **LUNE** En collaboration avec la Nasa, la société américaine Astrobotic lancera le 24 décembre son atterrisseur Peregrine chargé de se poser sur la Lune en prévision des prochaines missions habitées. **CHIMIE** Sans chaleur, la lumière pourrait faire s'évaporer l'eau selon une étude, qui montre que les photons suffisent à rompre les liaisons qui relient les molécules d'eau entre elles.

L'impression 3D combine les matériaux

INGÉNIERIE Obtenir en une seule opération des objets complexes combinant des matériaux souples, élastiques et rigides, c'est ce que permet une nouvelle technologie d'impression 3D assistée par scanner laser. Un système de retour d'information calcule la quantité exacte de résine ou de polymères à injecter à chaque couche, sans avoir à raboter les irrégularités comme le font les machines actuelles. De quoi façonner des robots complets en une seule fois comme cette main avec os, muscles et tendons synthétiques. **A. D.**

SOURCE : THOMAS BUCHNER, EPFZ, SUISSE



ETH ZURICH/T. BUCHNER

Cette main robotique a été imprimée en 3D en une seule fois.

Un livre académique rédigé par une IA

INFORMATIQUE En une journée, l'éditeur de publications académiques Springer Nature a utilisé le modèle de langage d'OpenAI, GPT3.5, pour générer 180 pages d'un livre traitant d'audit et de finance. À partir d'une table des matières définie, des auteurs, éditeurs et experts en IA étaient chargés d'écrire et réécrire les « prompts » (instructions) jusqu'à obtenir un résultat satisfaisant. Après quoi, le processus classique d'édition a repris son court pour un livre achevé en cinq mois, contre le double habituellement. **A. D.**

Starship : un échec prometteur

ESPACE Pour son deuxième essai à Boca Chica (Texas, États-Unis), la méga-fusée réutilisable de SpaceX a atteint les 140 km d'altitude avec une courbe de vol parfaite... avant d'exploser. Mais cette fois, l'impressionnant bouquet de 33 moteurs Raptors a parfaitement fonctionné. Une progression pour ce lanceur de 120 m de haut, partie prenante du retour des Américains sur la Lune. **O. L.**

SIPA

Lancement de la méga-fusée de SpaceX le 18 novembre au Texas.

Énergie record pour une particule cosmique

ASTROPHYSIQUE Une particule d'ultra-haute énergie a été détectée par le télescope Array (Utah, États-Unis), selon une étude publiée dans *Science*. Son énergie est de 244.10^{18} électronvolts. C'est environ la moitié de l'énergie cinétique d'une balle de tennis allant à 200 km/h, portée par une seule particule ! Baptisée « Amaterasu », du nom d'une divinité japonaise, son origine est un mystère car elle semble provenir d'une gigantesque région de l'Univers vide de galaxies ou presque. **F. N.**

KLAAS VERPOEST, JOHAN VAN LOOVEREN, LEEN DECIN

Proche de son étoile, la géante de glace perd peu à peu son atmosphère (vue d'artiste).

Recherche méthane désespérément sur WASP-107b

L'extrême précision du télescope spatial James-Webb permet d'affiner l'analyse de l'atmosphère de cette mystérieuse exoplanète.

L'exoplanète WASP-107b vient d'être passée au crible du télescope James-Webb (JWST). Cette géante de glace de type Neptune, découverte en 2017, captivait déjà les chercheurs avec son atmosphère très étendue, qu'elle est en train de perdre sous l'effet de son soleil. Mais la sensibilité de la caméra Miri équipant le JWST a pointé de nouvelles surprises. En plus de la vapeur d'eau et de l'hélium découverts précédemment, l'instrument a révélé la présence de dioxyde de soufre (SO_2) et de nuages de silicates. Selon les modèles, le SO_2 se formerait à l'issue d'une série de réactions chimiques par photodissociation à partir de l'eau et du sulfure d'hydrogène (H_2S). Toutefois, ces mêmes modèles prédisent la présence de méthane. Or, le JWST n'en a pas trouvé… Une anomalie en forme de bonne nouvelle, car elle va pousser les chercheurs à complexifier leur modèle pour tenter d'expliquer son absence apparente. Ce qui constitue une façon d'explorer, même à distance, la dynamique de ces atmosphères si exotiques en comparaison de la nôtre. **F. N.**

JOHNS-HOPKINS APL

Dragonfly a été testé avec succès à la Nasa.

Un drone pour explorer Titan

INGÉNIERIE Fin 2034, la Nasa explorera Titan, la plus grosse lune de Saturne, avec un drone volant de 450 kg nommé Dragonfly, équipé de quatre paires de rotor alimentées par un moteur à énergie nucléaire. Un prototype deux fois plus petit a été testé avec succès dans un tunnel de soufflerie reproduisant les conditions de Titan : une atmosphère plus dense que sur Terre et une gravité plus faible que la Lune. **J. I.**

1 391 560 kilomètres

Le diamètre du Soleil revu à la baisse

ASTRONOMIE Depuis les années 1970, la valeur admise correspondait à 1 391 980 km, déterminée par des méthodes optiques lors d'éclipses totales. Mais une nouvelle technique, fondée sur les ondes acoustiques produites par notre étoile, conduit à revoir très légèrement à la baisse la taille du diamètre de notre étoile. Une différence qui pourrait se répercuter sur les calculs de sa structure interne. **F. D.**

SOURCE : MASAO TAKATA, UNIVERSITÉ DE TOKYO, JAPON.

Fertiliser le sol lunaire grâce à des bactéries

MICROBIOLOGIE Les poussières (régolithe) qui parsèment la surface de la Lune peuvent être fertilisées grâce à des microbes. Lors d'essais menés sur des analogues du régolithe, trois bactéries se sont révélées particulièrement efficaces : *Bacillus mucilaginosus*, *Bacillus megaterium* et *Pseudomonas fluorescens*. En augmentant l'acidité du milieu, elles libèrent du phosphore, un élément essentiel pour la croissance des végétaux. **F. D.**

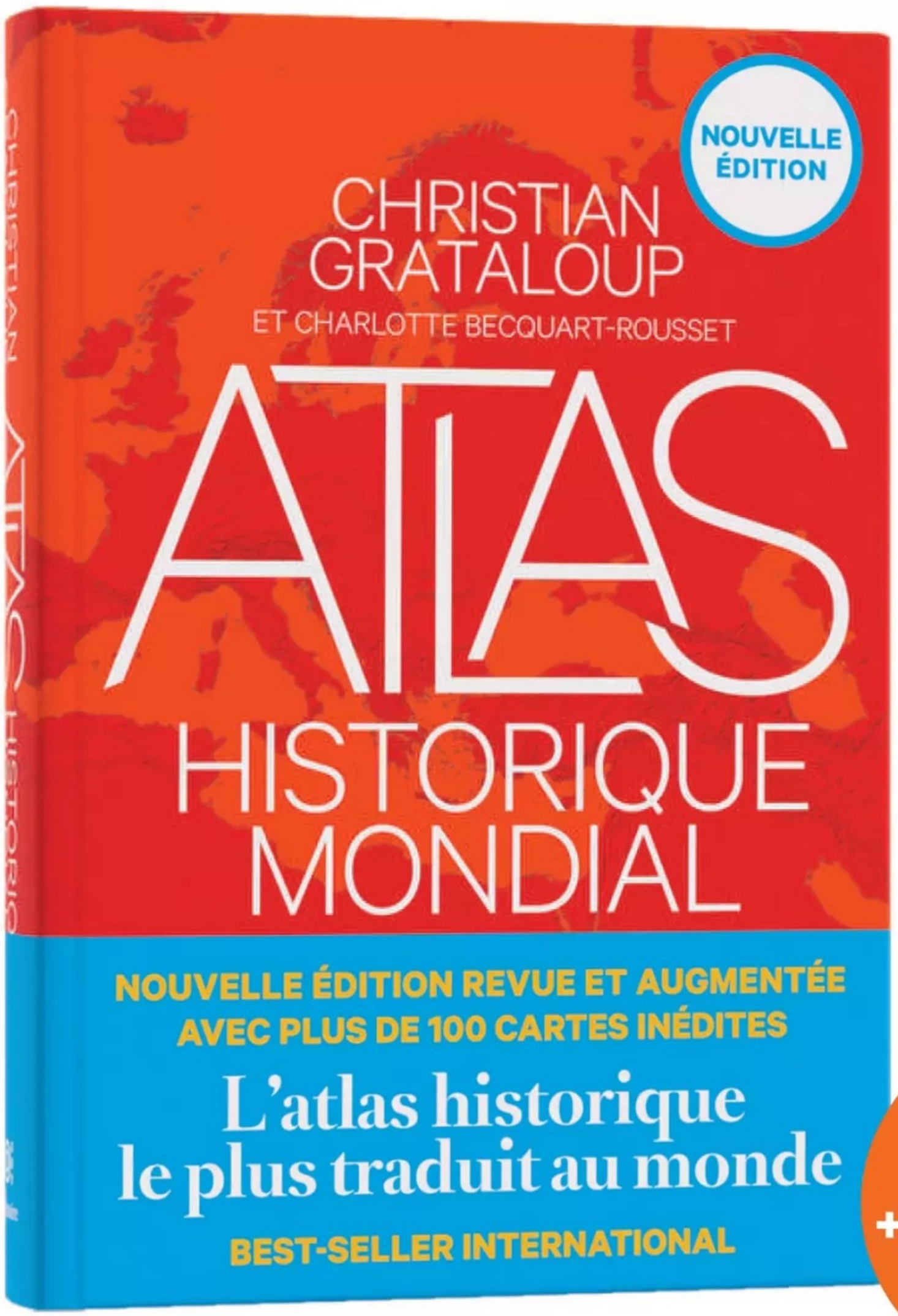
SOURCE : YITONG XIA, UNIVERSITÉ AGRONOMIQUE DE CHINE.

YITONG XIA/REUTERS

« Nicotiana benthamiana », une plante proche du tabac, utilisée ici comme modèle de culture.

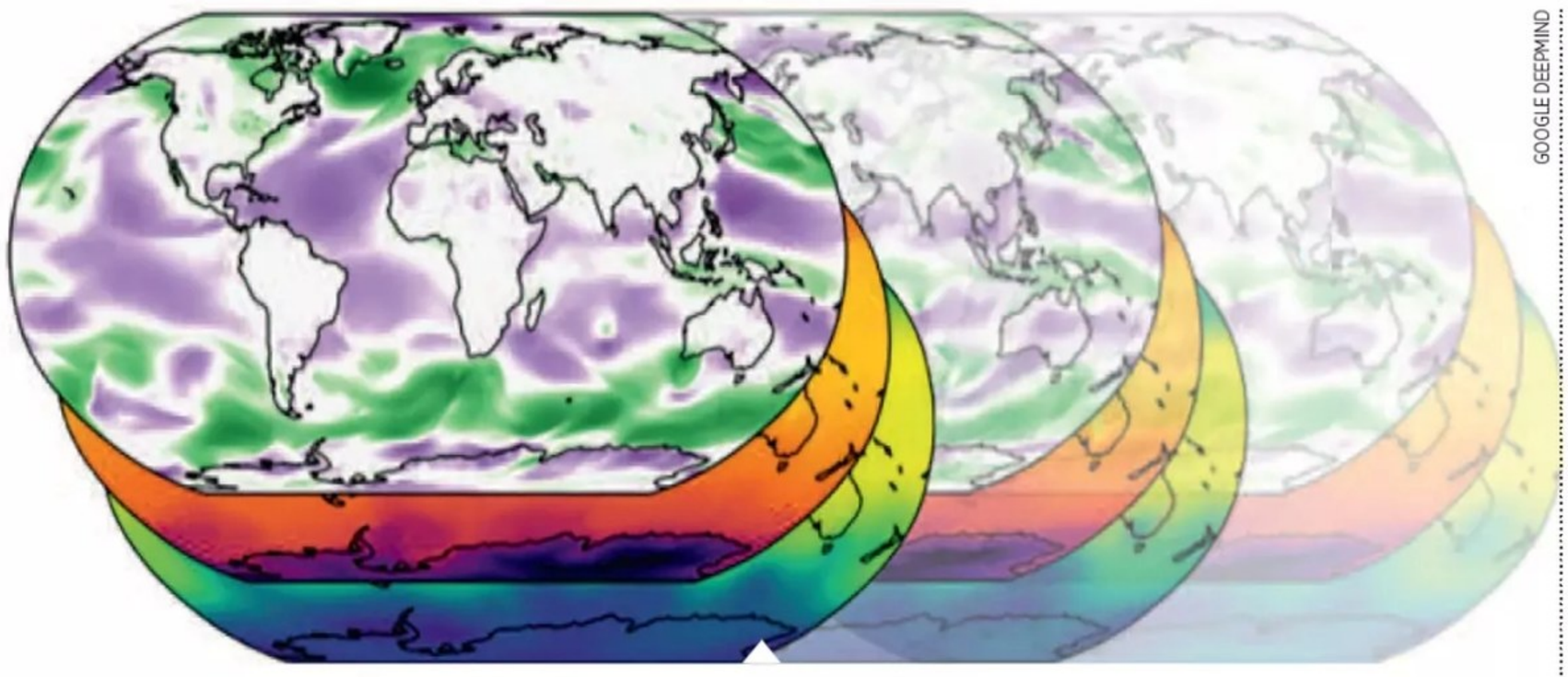
«On ne peut pas comprendre le monde sans le voir.»

Erik Orsenna
de l'Académie française



«Une indispensable synthèse cartographique de l'histoire du monde.»
Le Monde

Une création originale L'Histoire Les Arènes



GOOGLE DEEPMIND

Le modèle associe des variables telles que vitesse et direction du vent, température et précipitations.

L'IA s'attaque à la prévision météo

L'algorithme GraphCast est capable d'établir un bulletin météo précis sur dix jours en moins d'une minute.

C'est un véritable prévisionniste météo qui a été développé par DeepMind, la division intelligence artificielle (IA) de Google, et décrit dans *Science*. L'algorithme prend en données d'entrée la météo du moment sur un carré de 0,25 degré de latitude et de longitude, et ce qu'elle était six heures plus tôt au même endroit. L'algorithme en déduit alors le temps qu'il fera dans les six heures ; puis ces prévisions servent à leur tour de données d'entrée pour produire d'autres prévisions, et ainsi de suite, jusqu'à couvrir dix jours.

GraphCast est un réseau de neurones en graphes (GNN), où chaque donnée d'entraînement, d'entrée et de sortie est une structure de nœuds (*nodes* en anglais) reliés par des arêtes (*edges*). *« Les nœuds d'un graphe peuvent représenter n'importe quoi du moment que les arêtes représentent les relations entre eux,* explique Alvaro Sanchez-Gonzalez, coauteur de l'article. *Ces nœuds peuvent, par exemple, figurer les utilisateurs d'un réseau social, où les arêtes seraient les connexions entre deux utilisateurs. »*

Un entraînement à partir de 39 ans d'archives

Pour GraphCast, la surface de la Terre est représentée en 40 962 nœuds correspondant à ces fameux carrés de 0,25° de côté. À chacun sont associées des variables comme la température, la vitesse et la direction du vent, les précipitations, le niveau de la mer, l'humidité… le tout pour 37 niveaux de pression atmosphérique.

L'algorithme a été entraîné sur 39 ans d'archives du Centre européen pour les prévisions météorologiques à moyen terme (CEPMMT). Bilan ? Pour 90,3 % des 1380 variables évaluées, il surpasse le modèle HRES du centre européen. Il est aussi meilleur pour le suivi de trajectoire des cyclones, la prévision de températures extrêmes et les rivières atmosphériques, cause potentielle de tempête. Mais pour l'équipe de DeepMind, le modèle souffre de plusieurs limites. Sa résolution spatiale de 0,25°, d'abord, contre 0,1° pour le HRES normalement. Ensuite, sa nature déterministe. GraphCast ne sait pas livrer de probabilités et ne reflète pas le fait que, par nature, plus une prévision est effectuée en amont, moins précise elle est. **A. D.**

Une crevette arboricole découverte en Indonésie

BIODIVERSITÉ Outre la redécouverte de l'échidné à bec courbe d'Attenborough qu'on pensait éteint, une expédition scientifique dans les monts Cyclope, en Indonésie, a eu la surprise de découvrir une espèce de crevette de quelques millimètres vivant… dans les arbres ! Une étrangeté qui s'expliquerait par le niveau remarquable d'humidité et de précipitations au cœur de la forêt explorée. **P. K.**

SOURCE : JAMES KEMPTON, UNIVERSITÉ D'OXFORD, ROYAUME-UNI.

EXPEDITION CYCLOPS

Le crustacé a sans doute bénéficié de l'humidité régnant dans la région pour s'adapter.

276
Le nombre d'expressions faciales des chats

ÉTHOLOGIE À l'aide d'un logiciel spécialisé dans la détection des mouvements faciaux des chats, deux chercheuses ont passé au crible 194 minutes d'enregistrements vidéo réalisés dans un bar à chats de Los Angeles (États-Unis). Sur les 276 expressions ainsi dénombrées chez ces félins lors d'interactions entre eux, 45 % étaient amicales, 37 % agressives et 18 % intermédiaires. **L. M.**

SOURCE : LAUREN SCOTT, UNIVERSITÉ DU KANSAS, ÉTATS-UNIS.

Les mégafeux fertilisent l'océan

ÉCOLOGIE À l'occasion de l'un des plus importants incendies de Californie (États-Unis), le Thomas Fire, en décembre 2017, des chercheurs ont montré pour la première fois que les cendres des feux de forêt apportent des nutriments aux systèmes marins et favorisent la croissance du plancton. Soit l'inverse de la situation en eau douce, où les cendres sont toxiques. Jusqu'ici, les études marines concernaient les cendres volcaniques chimiquement différentes. **H. J.**

SOURCE : TANIKA LADD, UNIVERSITÉ DE CALIFORNIE À SANTA BARBARA, ÉTATS-UNIS.

IL A DIT

« Les participants ont trouvé que les plantes cultivées verticalement dans des tours avaient aussi bon goût que les légumes biologiques »

Michael Bom Frøst, chercheur à l'université de Copenhague (Danemark), à propos du premier test culinaire évaluant la saveur des légumes verts des fermes verticales destinées à réduire l'emprise au sol des cultures.

Les sables atmosphériques en forte augmentation

CLIMATOLOGIE Les tempêtes de sable et de poussière sont devenues de plus en plus fréquentes et graves, alerte la convention des Nations unies sur la lutte contre la désertification. Selon les experts, 2 milliards de tonnes partent dans l'atmosphère tous les ans, dont 25 % sont attribuables aux activités humaines. Si le phénomène est principalement naturel, il est exacerbé par le changement climatique, les sécheresses récurrentes et la dégradation des sols due à une agriculture mal maîtrisée. **L. C.**

M.AL-SUDANI / ANADOLU AGENCY / AFP

La désertification rend plus fréquentes les tempêtes de sable (ici à Bagdad, en Irak).

M.WALKER/ PHOTOSHOT / BIOSPHOTO

Le micro-organisme marin fragmente les microplastiques et contribue ainsi à la pollution.

Les rotifères, fabriques à nanoplastiques

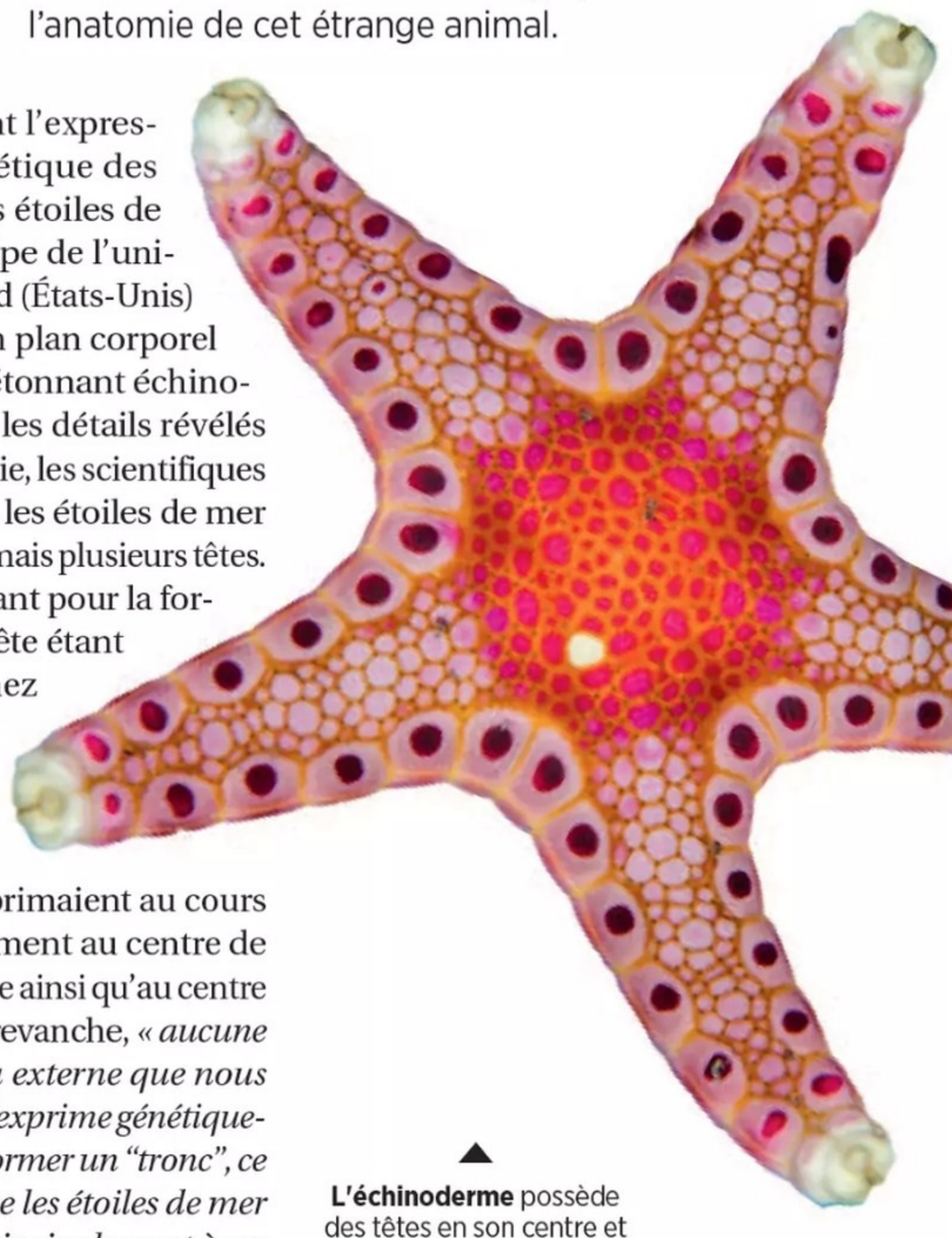
POLLUTION Invertébrés aquatiques microscopiques, les rotifères sont des mâcheurs de microplastiques, qu'ils décomposent en nanoplastiques, révèle une étude menée dans le lac Poyang, en Chine. Là, les chercheurs estiment que chaque rotifère produit 350 000 nanoparticules par jour, sachant qu'un seul microplastique peut en théorie être décomposé en un million de milliards de nanoparticules. **H. J.**

SOURCE : JIAN ZHAO, UNIVERSITÉ OCÉANOGRAPHIQUE DE CHINE.

Les étoiles de mer ont plusieurs têtes

Des chercheurs américains ont cartographié l'anatomie de cet étrange animal.

En étudiant l'expression génétique des tissus des étoiles de mer, une équipe de l'université Stanford (États-Unis) a pu établir un plan corporel précis de cet étonnant échinoderme. Parmi les détails révélés de son anatomie, les scientifiques montrent que les étoiles de mer n'ont pas une, mais plusieurs têtes. Les gènes codant pour la formation de la tête étant les mêmes chez tous les animaux, ils ont en effet pu observer qu'ils s'exprimaient au cours du développement au centre de chaque branche ainsi qu'au centre de l'étoile. En revanche, *« aucune partie du tissu externe que nous avons étudié n'exprime génétiquement de quoi former un "tronc", ce qui suggère que les étoiles de mer ressemblent principalement à un assemblage de têtes. »* **M. P.**

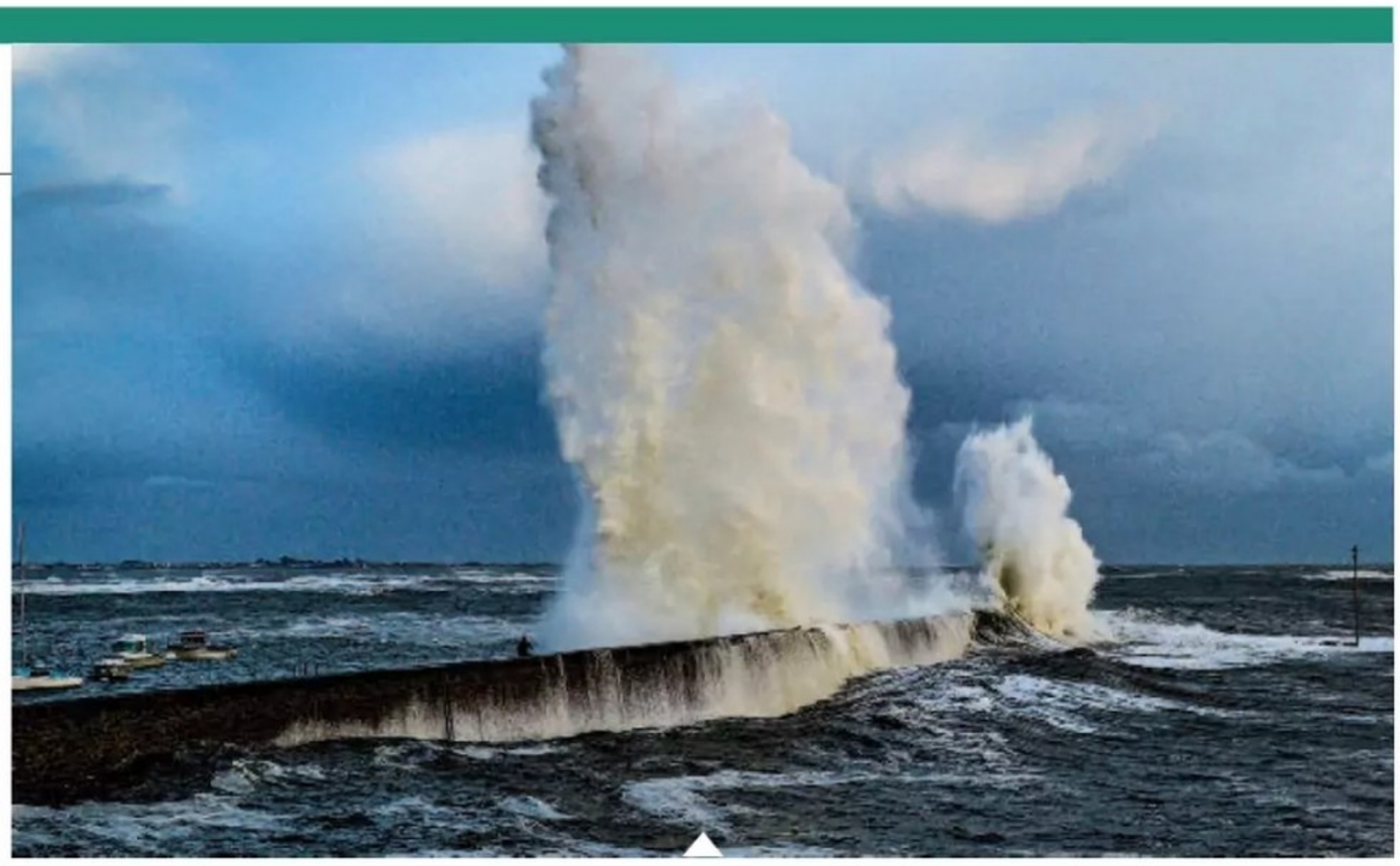


COLIN MARSHALL / BIOSPHOTO

L'échinoderme possède des têtes en son centre et au milieu de chacune de ses branches.

Faire face au danger de la submersion

Des scientifiques mettent en garde les villes côtières sur l'urgence de s'adapter à l'élévation du niveau de la mer.



VALERY HACHE/AFP

D'ici à 2100, la mer pourrait monter d'un mètre (ici à Lomener, Morbihan, en novembre 2023).

Lors du sommet One Planet Polar qui s'est tenu au Muséum national d'histoire naturelle, à Paris début novembre 2023, les scientifiques réunis dans l'initiative Sea'ties ont sonné l'alerte maximum sur l'érosion du littoral et le danger des vagues de submersion, en insistant sur la nécessité d'adaptation rapide des villes côtières à l'élévation du niveau de la mer. Si on ne sait pas encore donner le rythme exact de la fonte des calottes de l'Antarctique et du Groenland qui représentent 99,5 % du volume de glace de la planète, il est admis que sans une réduction drastique des émissions de gaz à effet de serre, la mer pourrait monter d'un mètre d'ici à 2100. Un milliard d'humains vivant à moins de 10 mètres au-dessus du niveau de l'océan sont concernés par ce phénomène. Sans adaptation, 14 milliards de milliards d'euros d'infrastructures côtières seraient affectées. Rien que pour l'Europe du Nord, le coût des submersions marines d'ici à 2100 est estimé à près de 30 milliards d'euros. **D. J. L.**

EN DEUX MOTS

COP28 Une vingtaine de pays dont les États-Unis, la France et les Émirats arabes unis ont appelé à tripler les capacités de l'énergie nucléaire dans le monde d'ici à 2050 pour réduire la dépendance au charbon et au gaz. **SOMMEIL** Selon une étude de leur activité cérébrale, les manchots à jugulaire d'Antarctique font 10 000 siestes de quelques secondes par jour. **CLIMAT** Le réchauffement a provoqué la fonte de 56 % de la surface des glaciers péruviens depuis 1970, entraînant la formation de nouveaux lacs.

Un refuge marin pour les cachalots aux Caraïbes

BIODIVERSITÉ Petit pays insulaire des Caraïbes, la Dominique a annoncé la création de la première réserve de cachalots au monde. À l'ouest de l'île, ces mammifères marins bénéficieront d'une zone protégée de 800 km² équivalente à la superficie terrestre de la Dominique où la pêche et la circulation des navires de plus de 18 mètres seront interdites. **H. J.**

T. WU/NATUREPL/EBPHOTO

Le cétacé sera protégé dans une zone de 800 km².

La mouche des neiges s'ampute contre le froid

ENTOMOLOGIE Une équipe a pu observer en temps réel, en laboratoire, comment la mouche des neiges est capable de se séparer d'une de ses longues pattes lorsque la température frôle les -10 °C. Un réflexe d'auto-amputation qui empêche le gel de gagner le reste du corps et lui permet de survivre, temporairement. **P. K.**

SOURCE : DOMINIC GOLDING, UNIVERSITÉ DE WASHINGTON, ÉTATS-UNIS.

P. NASKRECKI/MINDEN PICTURES/BIOSPHOTO

« Chionea valga » sacrifie ses pattes en cas de gel.

Un puissant gaz à effet de serre détecté en Chine

POLLUTION L'augmentation constante dans l'atmosphère de l'un des plus puissants gaz à effet de serre connu, le HFC-23, provient d'usines de l'est de la Chine, révèlent des mesures faites à partir de la Corée du Sud par une équipe internationale. En 2015, le pays s'était pourtant engagé à supprimer les émissions de ce gaz dans les quatre ans. Le HFC-23 est le sous-produit d'un autre puissant gaz à effet de serre, le HCFC-22, encore utilisé dans les climatiseurs et réfrigérateurs mais interdit depuis 2004 en Europe. **P. K.**

SOURCE : HYERI PARK, UNIVERSITÉ NATIONALE KYUNGPOOK, CORÉE DU SUD.

smeg dévoile sa boutique dédiée à l'élégance italienne

La marque italienne a fait fort pour l'inauguration ! Les trois étages se sont animés en présence de la critique gastronomique Emmanuelle Jary. La clientèle parisienne, française et étrangère peut désormais profiter de la plus importante exposition de France en plein cœur de la capitale.

Si SMEG est réputé pour ses appareils rétro et colorés, la marque est également en avance sur la technologie.

L'expertise s'illustre avec la gamme de fours « Galiléo ». Elle propose notamment un four 3 en 1. Il allie la cuisson traditionnelle, un micro-onde et un four 100 % vapeur dans un format standard de 60 cm. Un gain de place considérable.

Le style est toujours éclatant avec plus de dix esthétiques déclinables sur tous les appareils, du four à la table de cuisson en passant par l'évier.

Découvrez la gamme « Années 50's », madeleine de Proust pour certains, aussi fun que chaleureuse. Plus contemporaines, les nouvelles finitions Gris Neptune et Noir Mat font la part belle aux tendances.

L'icône incontournable « FAB », appréciée comme LE réfrigérateur branché, est disponible en finition mate ou brillante avec dix-neuf coloris et neuf éditions spéciales. Les petits appareils ne sont pas en reste, une nouvelle collaboration avec Dolce & Gabbana, est présentée en exclusivité.

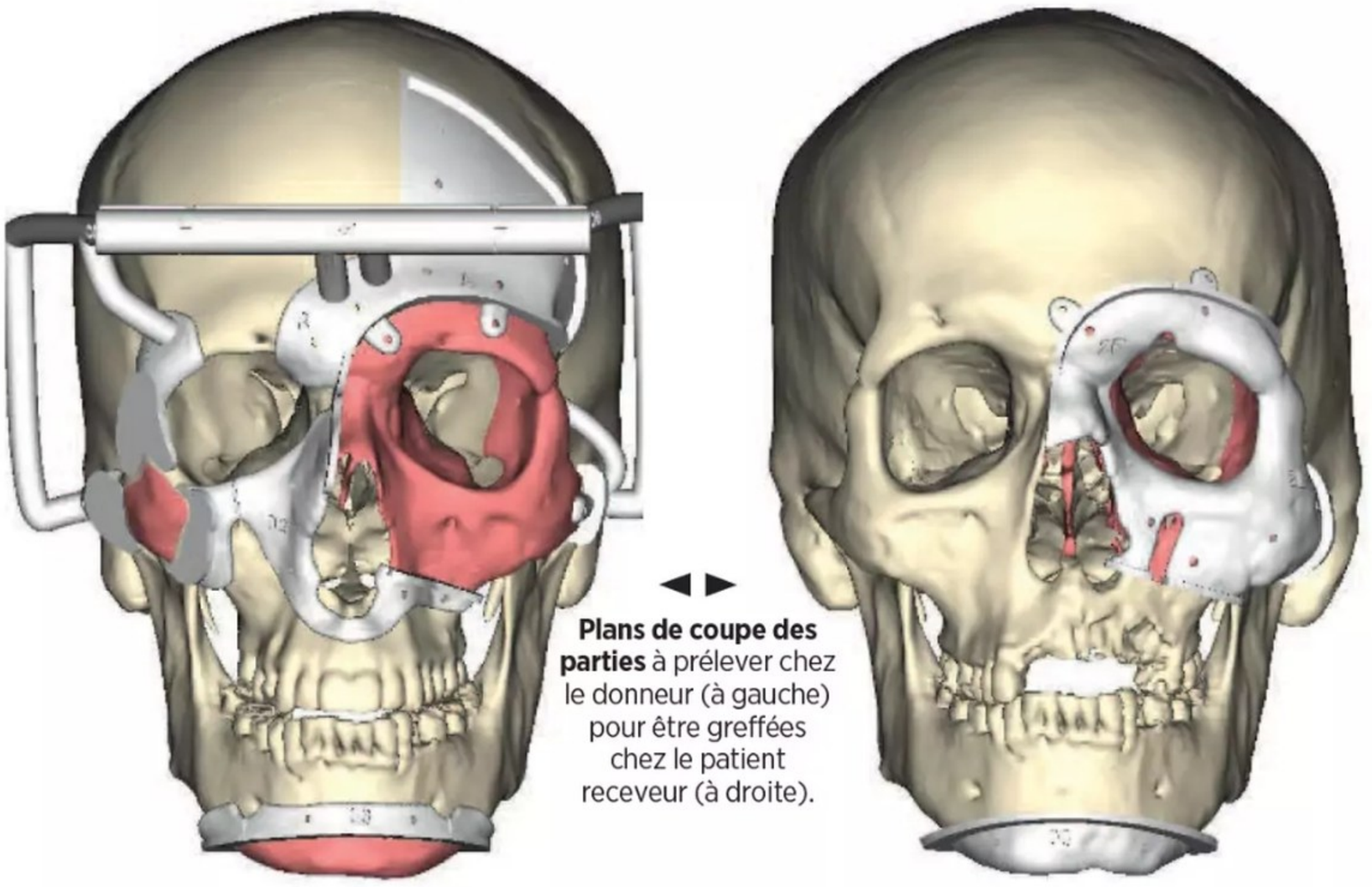
La famille Bertazzoni est toujours aux commandes et la tradition du « Made in Italy » demeure fièrement affichée sur les appareils depuis 1948, date de création de SMEG.

smeg STORE PARIS

VISITEZ DÈS AUJOURD'HUI LE SMEG STORE PARIS

82 Boulevard de Sébastopol – 75003 PARIS,
et laissez-vous emporter par l'élégance à l'italienne.

Pour plus d'informations, prenez contact par mail ou par téléphone via smegparis@daylac.fr ou au 01 42 78 67 25.



Plans de coupe des parties à prélever chez le donneur (à gauche) pour être greffées chez le patient receveur (à droite).

NYU LANGONE HEALTH

Première greffe d'un œil complet

Cette opération inédite a déjà permis de rétablir le flux sanguin dans la rétine mais pas encore la transmission d'informations vers le cerveau.

C'est une première mondiale qu'ont annoncée les chirurgiens de l'hôpital universitaire new-yorkais NYU Langone Health. Lors d'une opération d'environ 21 heures le 27 mai 2023, ils ont greffé un œil complet à Aaron James. Ce dernier avait été victime, en 2021, d'un accident du travail au cours duquel son visage avait touché une ligne électrique à haute tension.

Lors de cette reconstruction faciale inédite, les médecins ont greffé le nez, les lèvres, l'orbite et, surtout, le globe oculaire gauche prélevé sur un donneur décédé. Si Aaron James n'a pour autant pas encore retrouvé la vue de cet œil gauche, son nouvel organe montre des signes de bonne santé qui ont stupéfié le corps médical. Notamment parce que celui-ci a relevé un flux sanguin rétabli jusqu'à la rétine.

Par ailleurs, l'autre grand défi d'une greffe d'œil est de parvenir à rétablir la transmission d'informations vers le cerveau à travers le nerf optique. Ce dernier est en effet coupé chez le patient comme chez le donneur pour réaliser la greffe. C'est pourquoi, lors de l'opération, des cellules souches issues de la moelle épinière du donneur ont été injectées dans le nerf optique du patient, dans l'espoir d'améliorer sa régénération. « *Une grande partie de la rétine a pu être préservée, et nos tests montrent qu'elle est capable de générer un signal* », a expliqué Vaidehi Dedania. De quoi rétablir la fonction visuelle ? « *En médecine, on n'aime jamais dire jamais,* a déclaré cette spécialiste de la rétine lors d'une conférence de presse. *Nous allons continuer à le suivre, et voir comment les choses évoluent. Mais nous avons beaucoup d'espoir.* »

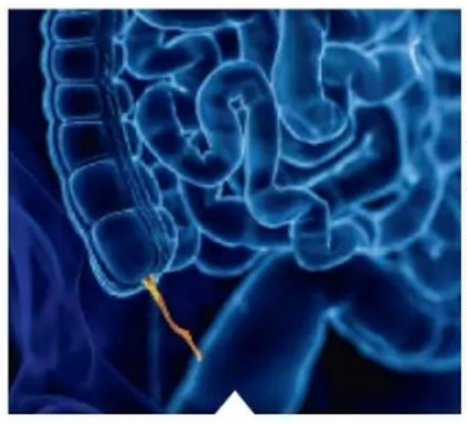
Pouvoir rendre la vue à des aveugles de naissance

Quoi qu'il en soit, pour le patient, l'opération est déjà un succès : « *Je peux de nouveau sentir et manger* », a-t-il raconté, indiquant qu'il était de nouveau prêt à « *sortir en public* ». Face au succès de l'opération, les médecins new-yorkais, eux, n'hésitent plus à espérer que ce genre de greffe puisse, dans les décennies à venir, rendre la vue à des aveugles de naissance. **H. J.**

Notre appendice nous protège des infections

GASTROENTÉROLOGIE En étudiant les dossiers vétérinaires de plus de 1000 primates, des chercheurs concluent que l'appendice joue bien un rôle protecteur contre les diarrhées infectieuses (environ 85 %) et leur sévérité. Un résultat extrapolable à l'humain, chez qui cette excroissance d'une dizaine de centimètres protégerait aussi des pathologies inflammatoires comme la maladie de Crohn. **H. R.**

SOURCE : MAXIME COLLARD, UNIVERSITÉ DE PARIS, FRANCE.



S. KAULITZKI/SPL/SUCRÉSALÉ

L'appendice (en jaune) se situe au niveau du gros intestin.

Un traitement restaure l'odorat dans le Covid long

INFECTIOLOGIE Une équipe a présenté une possible solution contre la parosmie, une dysfonction persistante du sens olfactif chez les personnes souffrant d'un covid long. L'injection d'un anesthésiant dans un ganglion nerveux à la base de la nuque a amélioré les symptômes pour 49 % des 22 patients traités. À confirmer dans un essai plus large. **H. R.**

SOURCE : ADAM ZOGA, UNIVERSITÉ THOMAS-JEFFERSON, ÉTATS-UNIS.

Le virus (ici vu au microscope électronique) a touché 5 millions de personnes ces quinze dernières années.

Enfin un vaccin contre le chikungunya

INFECTIOLOGIE Les États-Unis ont approuvé le premier vaccin contre le chikungunya, virus transmis par les moustiques, à l'origine de fièvres et de violentes douleurs articulaires chez l'adulte. Développé par le groupe européen Valneva et commercialisé sous le nom de Ixchiq, il sera autorisé pour les personnes de plus de 18 ans. Frappant essentiellement les zones tropicales, l'infection a touché quelque 5 millions de personnes ces quinze dernières années. **H. J.**

40 % L'augmentation de la mortalité sur un brancard

ÉPIDÉMIOLOGIE Selon une étude en France, une nuit passée sur un brancard aux urgences augmente de près de 40 % le risque de mortalité hospitalière des patients âgés, qui passe ainsi de 11,1 % à 15,7 %. Ce travail publié dans la revue *Jama* a été réalisé en hiver 2022, alors que circulaient trois virus (Sras-CoV-2, grippe, VRS). C'est la première fois que cette surmortalité a pu être chiffrée. **S. R.-M.**

SOURCE : MÉLANIE ROUSSEL, CHU ROUEN, FRANCE.

SCIENCE PHOTO LIBRARY / SUCRÉ SALÉ

KATALIN SCHAFFER ET AL.

Le dispositif, semblable à des ballons, permet de faire fléchir le poignet avec un mouvement proche de celui de l'articulation.

Un exosquelette gonflable aide à la rééducation

KINÉSITHÉRAPIE Une équipe d'ingénieurs a mis au point un exosquelette actionné par un système de gonflage/dégonflage capable de faire fléchir les poignets avec des rotations s'approchant de celles des articulations naturelles. Objectif : rééduquer les muscles des patients à domicile avec un dispositif léger (160 grammes) dépourvu de structures rigides. **H. J.**

SOURCE : KATALIN SCHÄFFER, UNIVERSITÉ DE NOTRE-DAME, ÉTATS-UNIS.

Une thérapie issue de CRISPR-Cas9 autorisée

Un médicament reposant sur la technique d'édition du génome nobélisée en 2020 a été approuvé au Royaume-Uni contre la drépanocytose.

Révolution en vue avec le premier médicament de thérapie génique issu de la technique d'édition de gène CRISPR-Cas9. Tout juste approuvé au Royaume-Uni, Casgevy (laboratoires Vertex et CRISPR Therapeutics) va permettre de guérir les patients britanniques atteints de deux maladies sanguines héréditaires parmi les plus répandues au monde, la drépanocytose et la bêta-thalassémie. Des cellules souches des patients seront prélevées et modifiées au moyen de la technique dite des ciseaux moléculaires afin de les rendre capables de produire de l'hémoglobine normale, qui fait défaut dans ces deux maladies. Les cellules seront ensuite réinjectées aux patients. L'Agence européenne du médicament a également entamé l'évaluation de ce médicament, dont le prix pourrait dépasser le million d'euros, mais n'a pas encore rendu son verdict. **S. R.-M.**

Les globules rouges en forme de faucille sont caractéristiques de la drépanocytose.

NIH/IMAGE POINT FR/BSIP

Les bactéries se partagent à distance des gènes de résistance

BACTÉRIOLOGIE Un nouveau mode de transfert de résistance aux antibiotiques entre bactéries vient d'être mis en évidence. Grâce à des techniques innovantes de microscopie, les scientifiques ont pu filmer en temps réel un transfert d'ADN entre des cellules même physiquement distantes. L'hypothèse selon laquelle ce transfert de gènes de résistance nécessite un contact direct entre elles était donc fausse. **S. R.-M.**

SOURCE : KELLY GOLDLUST, CNRS, FRANCE.

Des follicules pileux bio-imprimés en 3D

DERMATOLOGIE Alors que la culture d'épiderme en laboratoire est maîtrisée de longue date, y intégrer les structures d'où poussent les poils et cheveux restait un défi. Il vient d'être relevé haut la main par une équipe qui a réussi pour la première fois à bio-imprimer en 3D la couche inférieure de la peau avec des follicules pileux fonctionnels. De quoi améliorer les greffes de peau et, peut-être un jour, faire repousser les poils. **H. J.**

SOURCE : PANKAJ KARANDE, INSTITUT POLYTECHNIQUE RENSSELAER, ÉTATS-UNIS.

MPI OF MOLECULAR PHYSIOLOGY

Les filaments de protéines interagissant dans le muscle du cœur.

Dans l'intimité des fibres cardiaques

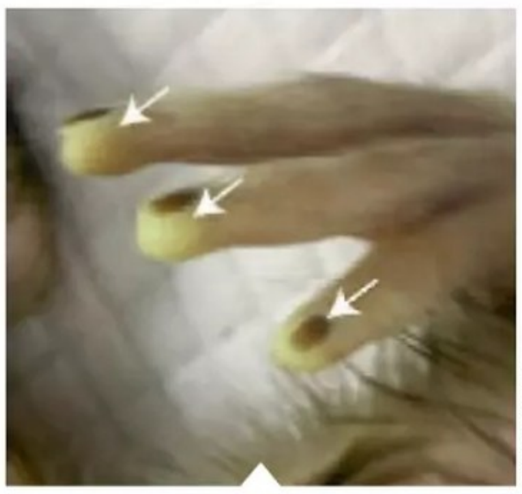
IMAGERIE C'est la première image en 3D et haute résolution des filaments épais et fins dont l'interaction permet la contraction du cœur. Les fins forment un entrelacs de vert (actine) et rose (tropomyosine), tandis que les filaments épais sont… tout le reste ! Avec en différentes nuances de bleu la myosine, dont les « têtes » irrégulières s'accrochent à l'actine pour contracter la fibre musculaire. **C. G.**

SOURCE : DAVIDE TAMBORRINI, INSTITUT MAX-PLANCK, ALLEMAGNE.

Naissance d'un singe chimérique

BIOLOGIE Pour la première fois, des chercheurs ont fait naître un primate à partir d'un embryon chimère, intégrant des cellules souches d'un autre macaque. Pour suivre leur répartition au cours du développement, ces cellules étrangères avaient été rendues fluorescentes grâce à un gène de méduse. C'est ce qui donne à l'animal une teinte verdâtre. Respectant les règles éthiques en vigueur, ces travaux visent à élaborer des modèles animaux de maladies humaines. **H. J.**

SOURCE : JING CAO, ACADÉMIE CHINOISE DES SCIENCES, CHINE.

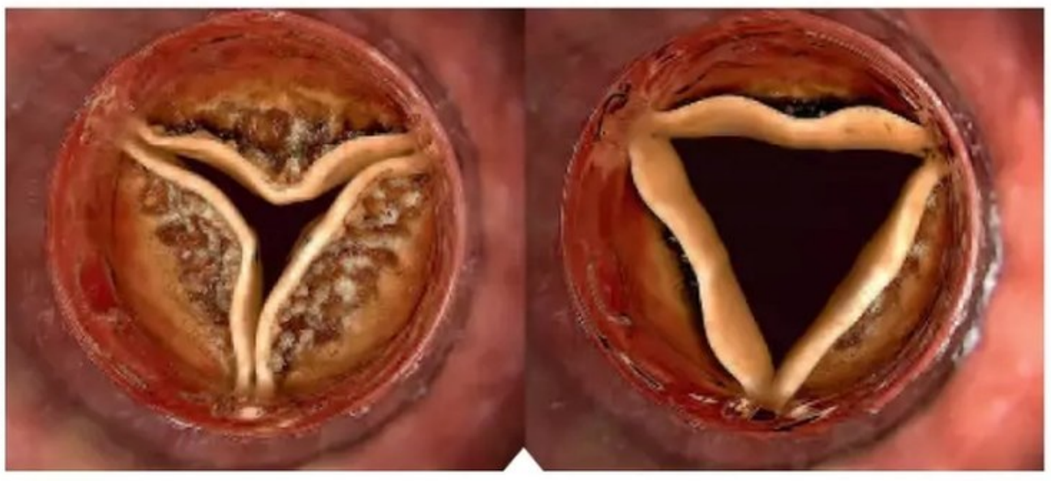


JING CAO ET AL.

Les tissus du macaque ont un aspect fluorescent dû à un gène de méduse.

Des ultrasons pour soigner le cœur

Une thérapie non invasive permet de nettoyer la valve calcifiée qui obstrue le passage du sang vers l'aorte.



CARDIAWAVE

Vue de la valve aortique avant (à gauche) et après le traitement.

Un essai clinique mené sur 40 patients à l'hôpital européen Georges-Pompidou à Paris a montré l'efficacité d'une thérapie non invasive innovante contre la sténose aortique. Diagnostiquée chaque année à 42 000 nouveaux patients de plus de 65 ans en France, cette calcification de la valvule aortique obstrue le flux sanguin du ventricule gauche vers l'aorte. Elle est généralement traitée par le remplacement de la valve par une bioprothèse, une opération impliquant la prise d'anticoagulants. Ici, une équipe française a eu recours à une technique d'ultrasons focalisés à haute fréquence développée à l'Institut physique pour la médecine de Paris (Inserm) pour nettoyer la valve. Par voie externe, sans chirurgie, les ultrasons ont en effet permis la micro-fragmentation du calcium bloquant la valve pour améliorer significativement la qualité de vie de ces patients. **H. J.**

4 %

La part d'Islandais pourvus d'un génotype actionnable

GÉNÉTIQUE L'analyse des données génomiques de 58 000 Islandais révèle qu'un habitant sur 25 possède un ou plusieurs gènes « actionnables », c'est-à-dire une prédisposition à des maladies pour lesquelles il existe des moyens préventifs ou thérapeutiques (cancers et maladies cardio-vasculaires notamment). Les chercheurs plaident pour une information préventive des potentiels futurs patients sur 73 gènes actionnables connus. **C. G.**

SOURCE : BRYNJAR JENSSON, DECODE GENETICS, ISLANDE.

Croisière
100% Francophone

LES JOYAUX CACHÉS DES ÎLES GRECQUES

À BORD DU MS HAMBURG
DU 23 AVRIL AU 2 MAI 2024

Avec la participation exceptionnelle de

CLAUDE SINTES*

Archéologue, conservateur en chef honoraire du Patrimoine, ancien directeur du Musée départemental Arles antique, chercheur associé auprès du CNRS

Par cette croisière nous allons revivre le périple des Grecs de Lesbos, d'Amorgos, de Santorin..., quittant leurs îles sous le patronage d'Apollon de Délos, pour fonder villes et colonies autour de la Méditerranée jusqu'à Nikaïa (Nice) qui sera notre destination finale.

En empruntant le même sillage qu'eux, en visitant certains de leurs comptoirs et les plus merveilleux vestiges qu'ils nous ont laissés, en parlant de leurs dieux, c'est toute cette migration désormais mythique qui va resurgir.

De tout cela je vous parlerai au cours de cette croisière à laquelle j'aurai le plaisir de participer !

Claude Sintès

Pour son itinéraire, la qualité des intervenants et celle des prestations proposées cette croisière est recommandée par Marc SAUGIER, créateur des :

Croisières du SAVOIR SCIENCES ET AVENIR La Recherche

2 Excursions Offertes♦
pour les lecteurs de Sciences et Avenir

Vous retrouverez également à bord nos 3 conférenciers :

OKSANA GARIN*
Spécialiste en Histoire de l'Art, littérature, mythologie et religions

CHRISTINE DARMAGNAC*
Diplômée de l'école du Louvre, de l'Institut d'Art et d'Archéologie

CÉDRIC CABANNE*
Professeur d'histoire géographie, spécialiste en géopolitique

À partir de 2 490 € /pers. en cabine intérieure double

Pour tout renseignement, réservation et demande de brochure de **nos croisières culturelles** contactez

Plein Cap Croisières au **04 93 20 21 20**
par courriel à **info@plein-cap.com** ou sur

www.plein-cap.com

PLEIN CAP CROISIÈRES

Une Expérience de plus de 35 ans dans le Maritime

Pour recevoir le programme détaillé merci de renvoyer ce coupon à
Plein Cap Croisières - 251 route de la Colle - 06270 Villeneuve-Loubet
ou ▶

Nom : . . . . . Prénom : . . . . .

Adresse : . . . . .

Code Postal : . . . . . .Ville :. . . . . .

Tél. : . . . . . Courriel :. . . . . .

Conformément à la loi « Informatique et Liberté » du 6 janvier 1978, nous vous informons que les renseignements ci-dessus sont indispensables au traitement de votre demande et que vous disposez d'un droit d'accès, de modification et de rectification des données vous concernant. Immatriculation IM006120053. Les Conditions Générales de Vente 2024 sont disponibles sur le site www.plein-cap.com ou se reporter à la brochure «L'appel du large 2024». Les conférenciers sont non contractuels, sous réserve de disponibilité. Crédits photos : shutterstock.com/imagIN.gr photography*
♦Offre réservée aux nouveaux inscrits, non rétroactive.

ANTHONY HUTCHINGS

Si « Thescelosaurus neglectus » s'abritait dans des terriers, il vivait la plupart du temps à l'extérieur (vue d'artiste).

Certains dinosaures creusaient des terriers

La reconstruction du crâne et du cerveau d'un herbivore indique qu'il possédait des traits associés aux animaux qui vivent sous terre.

Équipé pour vivre sous terre ! Willo, un *Thescelosaurus neglectus* dont le fossile est exposé au Musée des sciences naturelles de Caroline du Nord, (États-Unis), creusait peut-être des terriers en Amérique du Nord, juste avant l'extinction massive de la fin du crétacé, il y a 66 millions d'années. La reconstruction du crâne et du cerveau de cet herbivore plutôt costaud (3,6 m de longueur pour un poids de 340 kg), de la famille des thescelosauridés, indique qu'il possédait une combinaison unique de traits associés aux animaux qui vivent, au moins une partie de leur temps, sous terre. Ainsi, l'audition de Willo était limitée : il ne pouvait entendre que 15 % environ des fréquences que les humains détectent, et 4 % à 7 % de celles captées par les chiens ou les chats. Une mauvaise audition compensée toutefois par un excellent odorat, comme en attestent ses bulbes olfactifs très développés, plus gros que chez la plupart des dinosaures. Enfin, la reconstruction des canaux semi-circulaires, qui assurent des fonctions liées à l'équilibre dans l'oreille interne, témoigne d'un sens inhabituellement développé de l'équilibre. Autant d'attributs qui en font un potentiel dinosaure fouisseur.

« Nous n'avons pas de preuves directes de ce comportement chez T. neglectus. *En revanche, nous en avons chez d'autres thescelosauridés qui vivaient avant lui »*, précise David Button, paléontologue à l'université de Bristol (Royaume-Uni). Effectivement, plusieurs squelettes d'un thescelosauridé primitif, appelé *Oryctodromeus*, qui vivait il y a 95 millions d'années, ont été retrouvés enterrés dans des terriers en compagnie de juvéniles.

Une vie plus proche de celle du blaireau

Ce nouveau résultat suggère que ce caractère de fouisseur était présent dans cette lignée. *« Mais il ne faut pas imaginer un dinosaure vivant comme une taupe ! Un blaireau ou un lapin est un meilleur modèle auquel penser pour imaginer ce à quoi aurait pu ressembler leur vie. »* Ainsi, ces dinosaures auraient encore passé la plupart de leur temps sous le soleil mais auraient pu se réfugier dans des terriers pour se reproduire ou lors d'événements climatiques défavorables. ■ **J. I.**

120 millions d'années

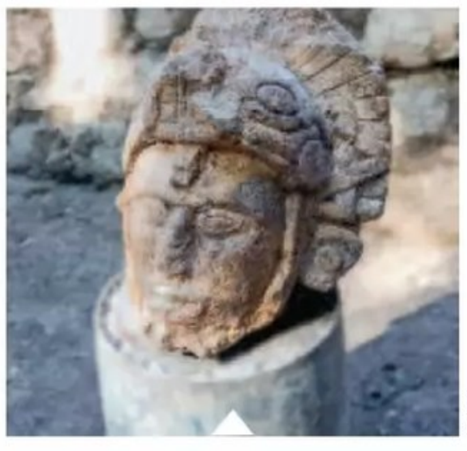
Les plus anciennes traces d'oiseaux dans l'hémisphère Sud

PALÉONTOLOGIE L'analyse de 27 empreintes d'oiseaux retrouvées dans la formation de Wonthaggi, en Australie, indique que plusieurs espèces se sont posées sur ce territoire qui était situé tout près du Pôle au début du crétacé. Peut-être pour une halte lors de migrations dans ce qui était alors une plaine inondable polaire. **J. I.**

SOURCE : ANTHONY MARTIN, UNIVERSITÉ EMORY, ÉTATS-UNIS.

Découverte d'une sculpture de guerrier maya

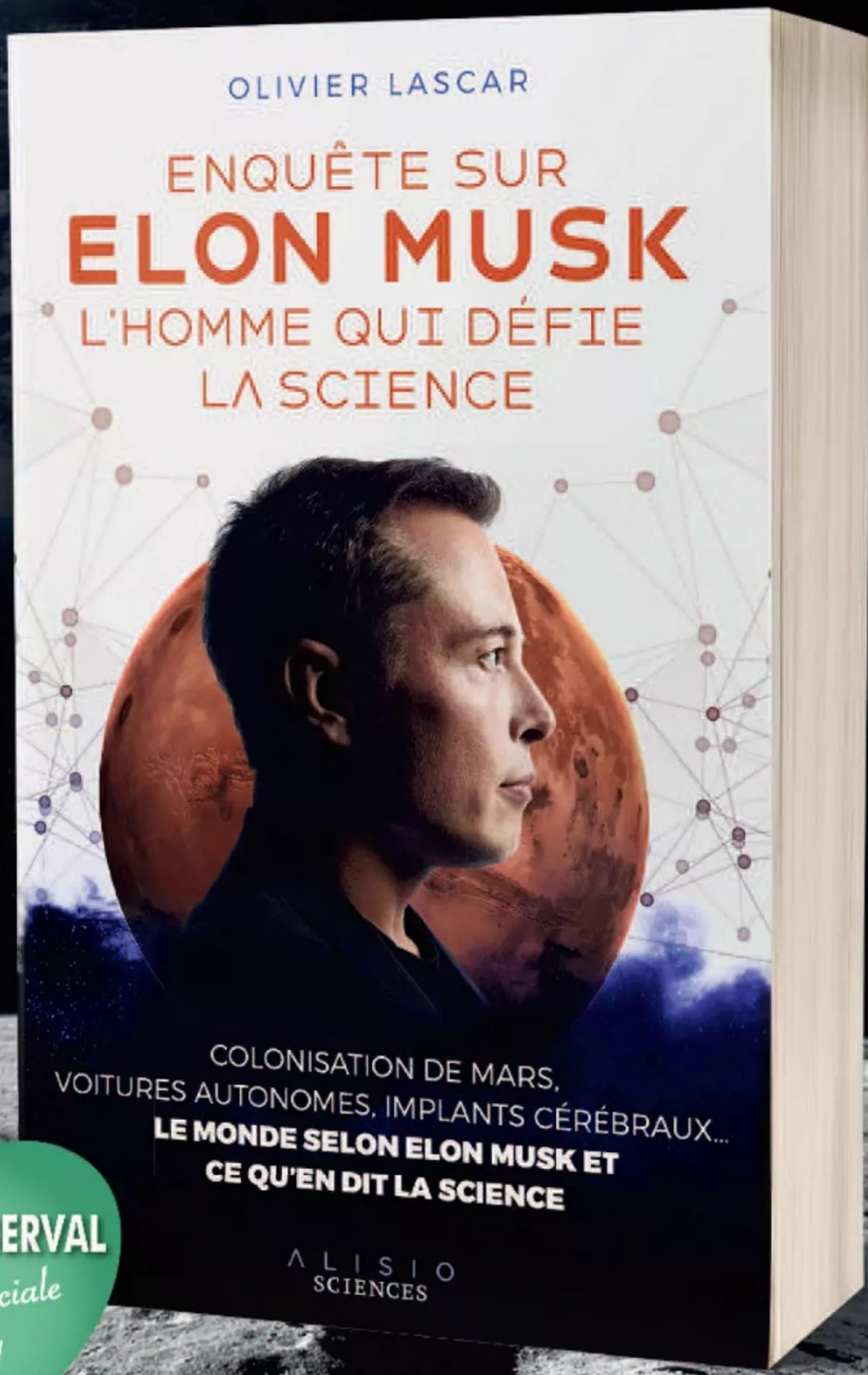
ARCHÉOLOGIE La tête d'une sculpture d'un guerrier maya a été découverte dans la péninsule du Yucatán (Mexique), sur le site de l'ancienne cité de Chichén Itzá, célèbre pour sa pyramide de Kukulcán. Selon l'Institut national d'anthropologie et d'histoire de Mexico, le casque en forme de serpent à plumes, gueule ouverte, dont est coiffé l'artefact de 33 cm, ferait allusion à la divinité serpent Kukulcán. **H. J.**



INAH

La tête sculptée a été mise au jour à Chichén Itzá (Mexique).

Jusqu'où Elon Musk fera-t-il avancer la science ?



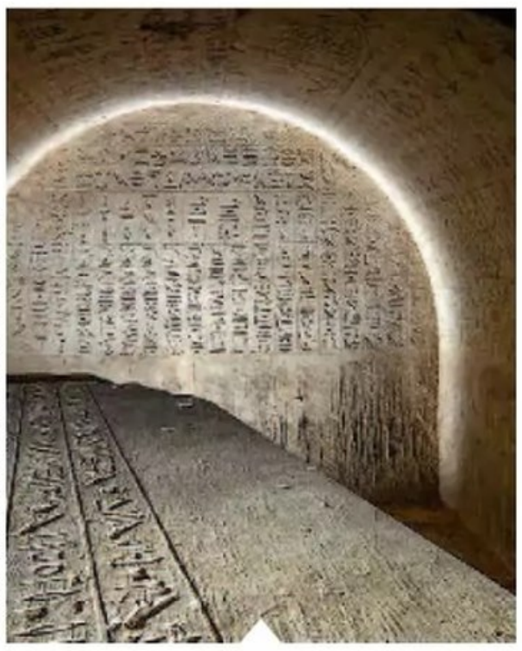
36e PRIX ROBERVAL

Mention spéciale du Jury

ALISIO

Un tombeau pour se protéger des serpents

ÉGYPTOLOGIE Une mission archéologique de l'université de Prague (République tchèque) a découvert une tombe au décor original sur le site d'Abousir, où était inhumée l'ancienne élite égyptienne de la Basse Époque. Celle du scribe royal Djehutyemhat ayant vécu sous la XXVIIe dynastie (VIe-Ve siècle avant notre ère) qui y a fait graver une multitude inédite de textes destinés à le protéger des morsures de serpent. **S. de L.**



PETR KOŠÁREK, CZECH INSTITUTE OF EGYPTOLOGY

Le mur sud de la chambre funéraire et le couvercle du sarcophage de Djehutyemhat.

Argoland, le continent du jurassique retrouvé

PALÉOGÉOLOGIE Au cours de la dislocation du supercontinent Gondwana, qui rassemblait l'Inde, l'Australie, l'Amérique du Sud et l'Afrique il y a 440 millions d'années, une plaque de 4 800 km de long, Argoland, semblait s'être comme évaporée. Des géologues sont parvenus à retracer sa dérive et la localiser en un archipel englouti au sud de l'Indonésie. **S. C.**

SOURCE : ELDERT ADVOKAAT, UNIVERSITÉ D'UTRECHT, PAYS-BAS.

AKG IMAGES - FACELAB, LIVERPOOL JOHN MOORES UNIVERSITY

À partir de l'imagerie scanner et d'analyses ADN réalisées sur sa dépouille (à gauche), les chercheurs britanniques ont reconstitué les traits du pharaon à l'âge de 90 ans (au centre) et à 45 ans (à droite).

Le visage de Ramsès II fidèlement reconstitué

Grâce à des techniques de pointe, la momie du célèbre pharaon a livré de nouveaux indices quant à l'apparence du souverain de son vivant.

C'est la plus précise des reconstitutions du visage de Ramsès II (vers 1304-1213 avant J.-C.) que vient de publier une équipe de l'université John-Moores de Liverpool (Royaume-Uni). Chaque détail de sa morphologie a été analysé à partir de l'imagerie scanner et de prélèvements sur la momie du pharaon. Ces examens ont permis d'estimer la quantité de chair sur chaque partie du visage, indiquant des pommettes saillantes et un menton assez large. L'analyse ADN, elle, révélait la couleur foncée de ses yeux, l'implantation des sourcils ou de ses cheveux, ondulés et roux. *« Ces portraits sont époustouflants. On a devant les yeux un personnage historique, qui respirait il y a plus de 3300 ans ! »*, s'émerveille Bénédicte Lhoyer, chercheuse à l'École du Louvre qui n'a pas participé à l'étude. Les données ont été incluses dans un modèle 3D permettant non seulement de reconstruire le visage à l'âge du décès du pharaon (près de 90 ans) mais aussi de le faire rajeunir. **M. P.**

Les Toaliens fabriquaient des armes en dents de requin

ARCHÉOLOGIE **Il y a 7000 ans, les Toaliens d'Indonésie utilisaient des couteaux hérissés de dents de requin. C'est ce que révèle l'analyse de deux dents de requin-tigre perforées retrouvées sur l'île de Sulawesi (Indonésie). Celles-ci étaient fixées à un manche à l'aide de fibres végétales et de mastic. À la guerre ou en cuisine, elles étaient très efficaces pour entailler les chairs.** **S. de L.**

SOURCE : MICHELLE LANGLEY, UNIVERSITÉ GRIFFITH, AUSTRALIE.

ALAMY/PHOTO12.COM

Reconstitution d'un couteau en bois hérissé de dents de requin attachées avec des fibres végétales et du mastic.

La vie sur Terre était plus facile à repérer au temps des dinosaures

ASTROBIOLOGIE Il y a entre 300 et 100 millions d'années, l'empreinte lumineuse de la Terre était plus favorable à la détection d'indices trahissant la présence de vie. À cette époque, qui couvre le règne des dinosaures, les niveaux d'oxygène et de dioxyde de carbone atmosphériques étaient plus élevés et certaines biosignatures plus visibles. Une piste pour l'étude de l'atmosphère des exoplanètes. **J. I.**

SOURCE : REBECCA PAYNE, UNIVERSITÉ CORNELL, ÉTATS-UNIS.

BNF

Ségurant, le chevalier au dragon

PALÉOGRAPHIE Après plus de dix ans de recherches dans les bibliothèques d'Europe, l'archiviste-paléographe Emanuele Arioli a pu restituer un roman arthurien inconnu : *Ségurant, le chevalier au dragon*, sans doute écrit entre 1240 et 1279 en Italie du Nord. Tombée dans l'oubli, l'œuvre s'inscrit dans le vaste cycle des péripéties des chevaliers de la Table ronde. Retrouver la trace de Ségurant, qui n'a rien d'un personnage secondaire, fut une quête digne du Graal pour le chercheur : il lui aura fallu réunir 28 manuscrits pour reconstituer son histoire complète. **M. B.**

◀ **Ségurant** est un héros à part entière des chevaliers de la Table ronde.

ELLE A DIT

« Un dragon de Komodo à qui on aurait mis des palmes et qu'on aurait rendu plus grand »

Amelia Zietlow, chercheuse en biologie comparative, décrivant une nouvelle espèce de mosasaure de 7 mètres, nommée *Jormungandr walhallaensis,* mise au jour dans le Dakota (États-Unis).

DR NIKHIL CHAUDHARY

Un groupe de Mbendjele, qui a servi de modèle d'étude.

L'éducation partagée des chasseurs-cueilleurs

ANTHROPOLOGIE Pour éclaircir la façon dont les premières sociétés de chasseurs-cueilleurs s'occupaient des enfants, des chercheurs ont étudié des groupes nomades de la République du Congo. Ils montrent que les nourrissons y reçoivent des soins et de l'attention de 15 personnes neuf heures par jour. De quoi favoriser les réponses apaisantes aux pleurs et soulager les mères. **C. L.**

SOURCE : NIKHIL CHAUDHARY, UNIVERSITY COLLEGE LONDON, ROYAUME-UNI.

L'actualité se poursuit sur Internet

www.sciencesetavenir.fr - www.larecherche.fr

OZKAN BILGIN/ANADOLU AGENCY/AFP - AFP - AFP - T. ROGER, NCCR PLANETS

BIODIVERSITÉ

Chez les bourdons, les ouvrières aussi se reproduisent

Contrairement à ce qui se passe chez d'autres insectes sociaux (abeilles, termites, fourmis), chez qui la division du travail est stricte, les ouvrières bourdons peuvent se transformer en reines et fonder de nouvelles colonies. Une solution de sauvegarde.
À lire sur le site de *La Recherche*. bit.ly/3GnaUKG

CINÉMA

« Historiquement, le film "Napoléon" est une catastrophe »

Jean Tulard, l'un des plus grands spécialistes de la période napoléonienne, nous a donné son avis, sans appel, sur le dernier film de Ridley Scott, *Napoléon*, sorti en salle le 22 novembre.
sciav.fr/923napo

POUR TOUT SAVOIR DE LA SCIENCE

SI VOUS AVEZ...

2 minutes

Quelle température sur Venus ou Pluton ?

Grillé sur Mercure ou congelé sur la planète naine Pluton... La Nasa fait le point en infographie sur les températures qui règnent à la surface des planètes du Système solaire.
sciav.fr/923temp

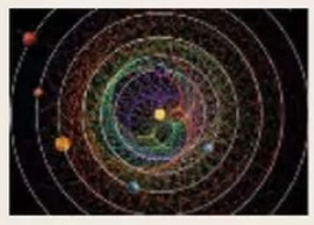
5 minutes

À Chartres, une cathédrale en poupées russes

Un réaménagement de la célèbre cathédrale a dévoilé quatre autres édifices construits successivement en son sein.
À découvrir dans notre reportage vidéo.
sciav.fr/923chartres

10 minutes

Découverte de six planètes en résonance



Les six astres de ce système sont pris dans une chaîne de résonance orbitale. Ils dansent une ronde dont la chorégraphie est inchangée depuis un milliard d'années.
sciav.fr/923syst6

Vous êtes déjà 2 millions à nous suivre sur Facebook

GÉOPHYSIQUE

Les colères de la Terre

Éruptions volcaniques, séismes, tempêtes, tsunamis… Les catastrophes naturelles ont frappé durement notre planète par le passé et le pire semble encore à venir. Dans ce dossier spécial, « Sciences et Avenir-La Recherche » détaille les progrès scientifiques pour mieux comprendre l'activité des supervolcans ou la survenue de bombes météo. Objectif : éviter de nouveaux drames humains.

Dossier réalisé par
Simone Caron, Loïc Chauveau, Franck Daninos, Arnaud Devillard, Sylvie Rouat

SUPERVOLCANS
L'Europe sous la menace d'une éruption majeure p. 32

SÉISMES
À quand le prochain « Big One » ? p. 37

TEMPÊTES
La nouvelle ère des bombes météo p. 40

FRANCE
La crainte d'un séisme destructeur p. 43

DÉTECTION
3 innovations pour réduire les risques p. 47

MIGUEL MORENATTI/AP/SIPA - SIMON TOWNSLEY/PANOS-REA - EUMETSAT

Le volcan Fagradalsfjall, en Islande, est entré en éruption en 2021 après 800 ans d'inactivité, et menace toujours le sud-ouest de l'île.

Un séisme de magnitude 7,8 a frappé la Turquie (ici à Islahiye) et la Syrie le 6 février, faisant plus de 50 000 victimes.

Les tempêtes Ciaran (ici une image satellite du 2 novembre) et Domingos de cet automne ont été particulièrement virulentes.

Catastrophes annoncées

Quelles que soient les catastrophes qui ont dévasté un territoire, l'humain est ainsi fait : malgré l'histoire, il ne quitte pas les terres de ses ancêtres. Une folie ? À l'échelle des colères de la Terre, elle peut paraître « raisonnable ». On parle de crue ou de tempête « centennales », de séismes majeurs qui se produisent à plusieurs siècles d'écart, de phénomènes volcaniques qui reviennent à l'échelle du million d'années. Au regard d'une génération d'humains, on pourrait donc se croire à l'abri. Pourtant, reprenons les chiffres. Il y a 70 % de chances qu'un séisme majeur se produise au cours des trente prochaines années au Japon ou en Californie. En Europe, plus précisément en Méditerranée, un supervolcan dont l'activité suit des cycles d'environ 10 000 ans et dont la dernière éruption remonte à 8000 ans donne des signes d'activité depuis plus de quinze ans. En France, les zones exposées aux tempêtes et aux inondations sont connues et un tsunami a 100 % de chances de se produire d'ici à 2050. Même si l'Hexagone est éloigné des grandes frontières de plaques, il est traversé par des failles rendant réel le risque sismique. Dans ce dossier, il ne s'agit pas de « jouer à se faire peur ». Juste de rappeler que les colères futures de la Terre sont certaines. Seule l'heure où elles se produiront nous échappe. Les comprendre et les localiser : voici le rôle de la science pour prévenir les drames humains. ■ **M. N.**

SUPERVOLCANS

L'Europe sous la menace d'une éruption majeure

Yellowstone, Santorin… Les éruptions des supervolcans ont bouleversé le visage de la Terre par le passé. Aujourd'hui la région de Naples, en Italie, est menacée par la recrudescence d'activités sismiques des champs Phlégréens.

Sommes-nous à la veille d'un cataclysme en Italie, qui pourrait affecter l'Europe, voire tout l'hémisphère Nord ? Plusieurs scientifiques s'en alarment. Situé dans la région surpeuplée de Naples, le supervolcan des champs Phlégréens (« brûlants » en grec), dont la dernière éruption remonte à 1538, connaît depuis 2005 une recrudescence d'activité sismique. Elle s'est intensifiée ces dernières années et plus encore ces derniers temps, avec un soulèvement du sol de 15 millimètres par mois et plusieurs dizaines de tremblements de terre par jour. Dernièrement, cette activité semblait s'être calmée. Mais le 23 novembre 2023, *« après un mois de calme relatif, il y a eu une secousse de magnitude 3,1 qui a effrayé la population,* s'émeut Giuseppe Mastrolorenzo, volcanologue à l'Institut national de géophysique et de volcanologie (INGV) à Rome. *Et ce, alors que tout le monde avait l'illusion que le phénomène touchait à sa fin.* » En réalité, les scientifiques ne connaissent pas les causes du bradyséisme, qui se caractérise par des élévations ou des affaissements du sol d'origine volcanique, et son lien avec l'imminence d'une éruption. *« Il existe plusieurs hypothèses et modèles scientifiques, tous valables, mais contradictoires »*, explique le volcanologue. L'idée qu'une éruption devrait se pro-

Bien plus intense qu'un volcan (ici, l'Etna, en Italie, qui est à nouveau entré en éruption en décembre dernier), un supervolcan peut projeter des panaches à plusieurs dizaines de kilomètres d'altitude.

WESTEND 61/HEMIS.FR

duire pendant la phase de bradyséisme intense, c'est-à-dire de soulèvement du sol, de tremblements de terre et d'écoulement de gaz, ne s'applique pas selon le chercheur à la caldeira des champs Phlégréens, qui se range dans la classe des supervolcans.

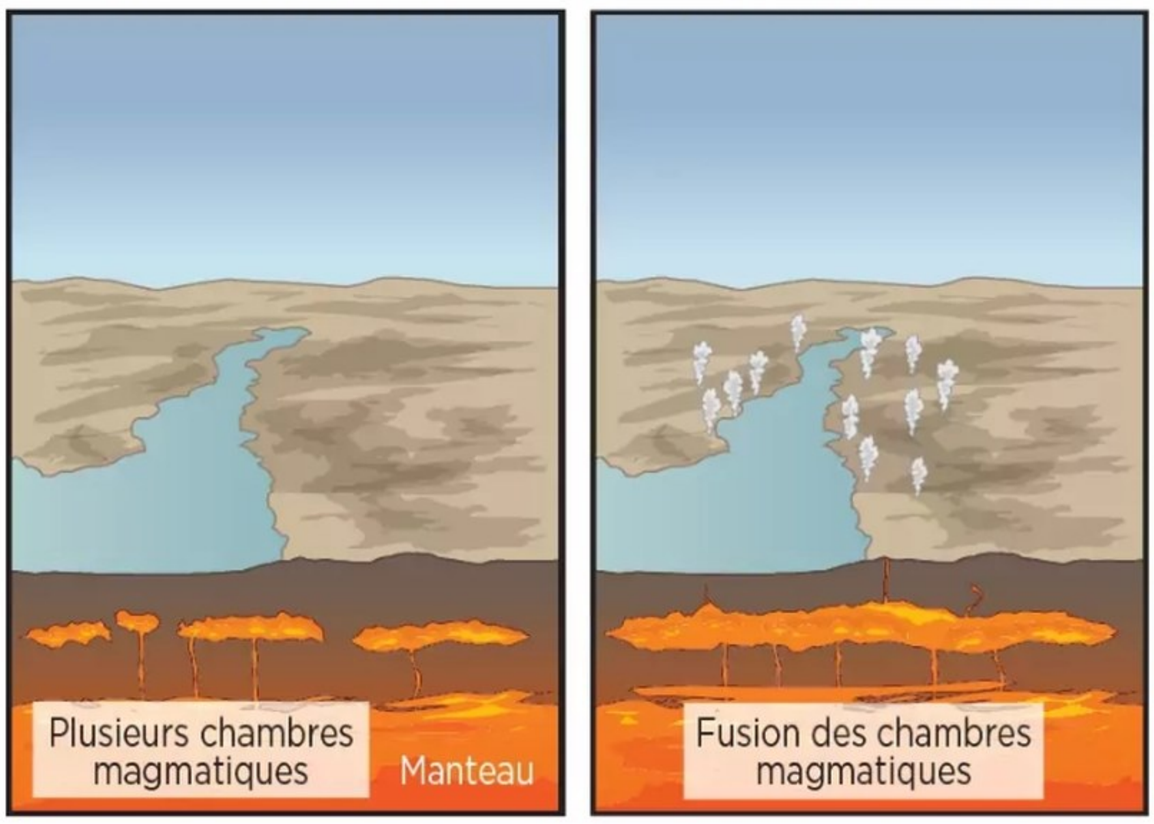
Qu'est-ce qu'un supervolcan ? « *Il n'y a pas de définition formelle. Le terme a été forgé en l'an 2000 à l'occasion d'un documentaire de la BBC,* indique Olivier Roche, chercheur au Laboratoire magmas et volcans (LMV) de l'université Clermont Auvergne. *Néanmoins, ce terme désigne aujourd'hui les plus grands volcans, qui émettent des centaines, voire des milliers de kilomètres cubes de matériaux.* » L'institut d'études géologiques américain (USGS) applique, quant à lui, cette étiquette aux éruptions éjectant plus de 1000 km³ de matériaux volcaniques. Ces grands volumes sont associés à une caldeira, c'est-à-dire une cuvette d'effondrement qui se forme lorsque la chambre magmatique est vidangée et qui peut s'étendre sur des dizaines de kilomètres. L'éruption, il y a 74 000 ans, du volcan Toba sur l'île de Sumatra, en Indonésie, a ainsi creusé une dépression de 100 km de long sur 35 km de large, qui abrite aujourd'hui le plus grand lac volcanique du globe.

Une éruption de supervolcan « *projette des panaches qui peuvent atteindre plusieurs dizaines de kilomètres d'altitude et rejoindre la stratosphère,* explique Olivier Roche. *Ils sont susceptibles d'être captés par les grands courants atmosphériques, qui les redistribuent à l'échelle de l'hémisphère. Cela peut alors contribuer au réchauffement ou à une baisse des températures.* » Une telle éruption qui se produirait sous l'eau ou sur le littoral entraînerait également des tsunamis destructeurs. « *Le magma s'accumule dans des chambres du manteau sur des dizaines voire des centaines de milliers d'années par séries d'injections successives,* poursuit le chercheur. *Avec le temps, les volumes magmatiques deviennent énormes. Il faut donc que la pression dans le réservoir soit aussi très importante pour qu'une*

éruption se produise : plus la chambre est grande, plus la pression doit être forte pour pousser le magma vers la surface. » Les champs Phlégréens sont-ils parvenus à ce point de bascule ? « *Mes recherches, confirmées depuis par d'autres travaux, montrent que les éruptions explosives des champs Phlégréens sont toutes associées à une montée très rapide du magma, parfois en quelques heures, avec des signes d'ampleur discrète juste avant,* avertit Giuseppe Mastrolorenzo. *En fait, une éruption très puissante peut se produire à tout moment, y compris pendant une phase d'accalmie.* » Selon lui, il est quasiment certain que les champs Phlégréens connaîtront plusieurs éruptions pendant encore des centaines de milliers d'années, car cette région volcanique est très jeune. De nombreuses données géophysiques et volcanologiques indiquent la présence, entre 8 et 10 km de profondeur, « *d'une chambre magmatique horizontale s'étendant sur des centaines de kilomètres carrés, commune au Vésuve et aux champs Phlégréens. D'après les mesures chimico-minéralogiques, la chambre semble être déjà différenciée, riche en gaz et prête à entrer en éruption, sachant qu'aucune prévision n'est fiable à court et moyen termes* », indique-t-il.

La colère d'un supervolcan

Situé en Nouvelle-Zélande, le Taupo est un supervolcan dont la caldeira est aujourd'hui occupée par un lac. Après la fusion de ses chambres magmatiques, il y a 26 500 ans, ce monstre géologique a produit une des éruptions les plus violentes au monde.



Or, ce supervolcan napolitain et tout le système volcanique de la région ont déjà imprimé à plusieurs reprises par le passé leur marque sur le continent européen, comme le relate la revue *Geology* qui vient de publier les résultats d'une étude américaine menée sous la direction de Derek Sawyer, directeur du Laboratoire de géologie et géorisques à l'université de l'Ohio. Lors d'une expédition en Méditerranée, les chercheurs ont en effet découvert quatre gigantesques gisements circulaires de matériaux volcaniques, de toute évidence liés à des éruptions massives qui se sont produites au cours des 40 000 dernières années. Située en Méditerranée occidentale, la mer Tyrrhénienne est un bassin « *où se produisent un volcanisme actif et des tremblements de terre puissants, quoique peu fréquents,* décrit Derek Sawyer. *Les côtes environnantes sont vulnérables aux tsunamis, aux glissements de terrain sous-marins, aux éruptions volcaniques et aux effondrements de flancs. Le tremblement de terre catastrophique de Messine, au nord-est de la Sicile en 1908 et le tsunami qui l'a suivi ont fait au moins 60 000 victimes.* » Le sud de ce bassin abrite également le plus grand volcan sous-marin de la Méditerranée et plus grand édifice volcanique actif d'Europe : le mont Marsili. D'une hauteur de 3500 mètres, il culmine à moins de 500 mètres de la surface de l'eau.

HISTORIQUE

Les quatre éruptions records

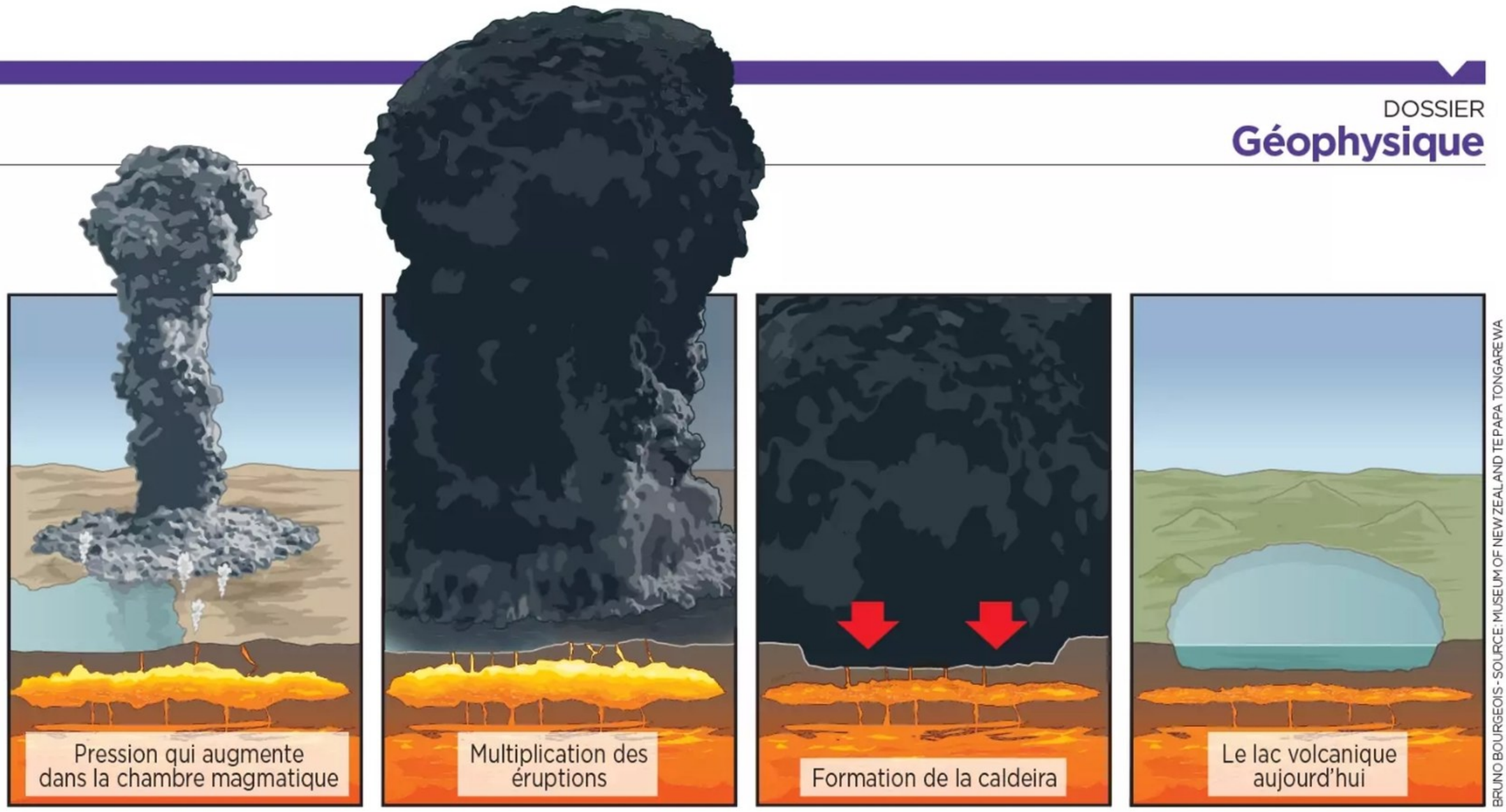
Plusieurs éruptions de supervolcans ont eu un impact majeur sur l'environnement. Voici les plus notables.

▸ **YELLOWSTONE (ÉTATS-UNIS).** Ce supervolcan a connu plusieurs éruptions massives, il y a 640 000 ans, 1,3 et 2,1 millions d'années. Ayant une périodicité d'environ 600 000 ans, un événement brutal est prévisible à terme. Sa caldeira s'est élevée d'environ un mètre entre 1923 et 1985, signe de l'activité de son immense chambre magmatique à dix kilomètres de profondeur.

▸ **LONG VALLEY (ÉTATS-UNIS).** Situé en Californie, le volcan de Long Valley a été le fruit, il y a 760 000 ans, d'une éruption qui a libéré 600 km^3 de matières et provoqué l'effondrement en caldeira d'une zone de 32 km de long et 17 km de large, avec des parois s'élèvant jusqu'à 3000 m. Cet épisode recouvrit de cendres l'ouest des États-Unis.

▸ **TAUPO (NOUVELLE-ZÉLANDE).** Au centre de l'île du Nord, le lac Taupo occupe la caldeira d'un volcan, théâtre de plusieurs éruptions majeures, dont celle d'il y a 26 500 ans. Sa dernière éruption date d'il y a 1800 ans.

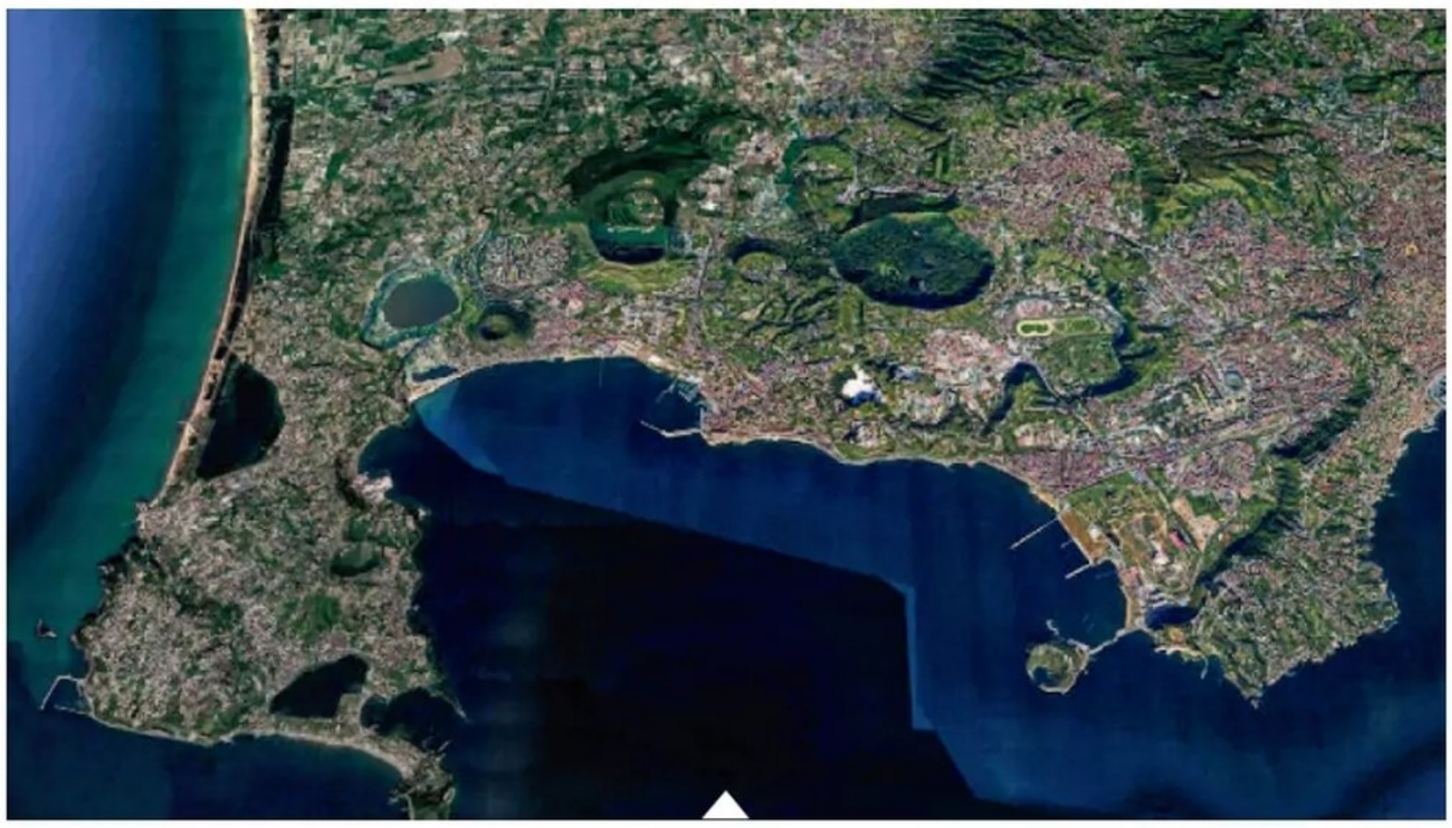
▸ **SANTORIN (GRÈCE).** L'île de Santorin, dans la mer Égée, est un pan de la caldeira d'un volcan qui a connu vers 1600 avant J.-C. l'une des plus grandes éruptions massives de l'histoire humaine, à l'origine d'un raz-de-marée dont on trouve les traces en Crète et dans les îles environnantes.



BRUNO BOURGEOIS - SOURCE: MUSEUM OF NEW ZEALAND TE PAPA TONGAREWA

« Sa crête sommitale est [aujourd'hui] affectée par une activité hydrothermale généralisée », constate le géophysicien Glauco Gallotti dans un article publié en 2020 par des chercheurs de l'université de Bologne (Italie), qui étudiaient les risques de tsunamis résultant de glissements de terrain sur ses flancs. *« Les ruptures de volume extrême ont le potentiel de créer des tsunamis désastreux,* indiquent les chercheurs. *Les simulations montrent que les vagues de tsunami atteindraient les îles éoliennes en dix minutes environ et les côtes de Calabre et de Sicile en vingt minutes ! »*

Pour préciser ce danger, Derek Sawyer et son équipe ont à leur tour réalisé des profils haute résolution du bassin. C'est ainsi qu'ils ont identifié quatre dépôts sédimentaires de 10 à 25 mètres d'épaisseur à environ 3000 mètres de profondeur dans le bassin occidental du Marsili. Les carottages ont montré qu'ils étaient d'origine volcanique. Mais selon leurs analyses, ces lits volcaniques ne proviendraient pas du mont Marsili voisin, mais plutôt de la province volcanique du nord de la Campanie, qui comprend de nombreux volcans actifs ou éteints dans la baie de Naples et sa région. Le plus connu est le Vésuve, qui en l'an 79 a enseveli Pompéi et les villes voisines sous les cendres. Il comprend aussi le supervolcan des champs Phlégréens, qui émet régulièrement des fumerolles et jets de fumées sulfurées, le mont Époméo sur l'île d'Ischia et quatre volcans sous-marins, dont le mont Marsili.



GOOGLE EARTH

Les champs Phlégréens couvrent une zone très peuplée dans la baie de Naples (Italie).

Des méga-éruptions ébranlant l'équilibre planétaire

La plus ancienne de ces caldeiras date d'il y a quelque 40 000 ans. À la même époque, les champs Phlégréens connaissaient une puissante éruption qui éjecta 80 à 150 km³ de tuf gris (ignimbrite), une roche poreuse de faible densité. Par comparaison, l'éruption du volcan Hunga Tonga en 2022 dans l'océan Pacifique, dont l'onde de choc a fait le tour du globe et projeté des cendres jusqu'à environ 50 km d'altitude, a émis un volume de seulement 6 km³. Cette éruption explosive des champs Phlégréens, qui serait la plus grande éruption survenue en Europe au cours des 200 000 dernières années, a injecté une quantité magistrale de cendres dans l'atmosphère et plongé tout l'est de l'Europe et l'Asie du Sud-Ouest dans un long « hiver volcanique ». Certains scientifiques pensent que cet événement aurait entraîné la disparition de Neandertal. Si cette hypothèse demeure controversée, il est probable cependant que cet épisode cataclysmique ait anéanti une large partie de l'habitat et des territoires de chasse de notre lointain cousin. La seconde caldeira date d'environ 32 000 ans, tan-

dis que la troisième aurait été formée à la suite d'une série d'éruptions qui, il y a environ 15 000 ans, ont déposé quelques dizaines de kilomètres cubes de tuf jaune. La plus jeune des caldeiras a 8000 ans. Ces quatre immenses lits volcaniques, témoins d'éruptions massives à intervalle de 10 000 à 15 000 ans, attestent de la très grande activité volcanique du golfe de Pouzzoles, et de son supervolcan.

Ces méga-éruptions peuvent avoir un impact sur la vie planétaire en injectant des mégatonnes de cendres et de gaz dans la stratosphère, notamment du dioxyde de soufre qui, en réagissant avec l'eau, produit des aérosols d'acide sulfurique qui réfléchissent la lumière solaire, entraînant un refroidissement de la surface de la Terre, soit un « hiver volcanique » qui va perturber les cycles de précipitations. Excès de pluie ici, sécheresses ailleurs vont engendrer des pénuries alimentaires, tandis que l'air saturé de cendres et de gaz va mettre à mal la vie terrestre.

L'un des membres les plus notables de l'étroite tribu des supervolcans mondiaux est sans nul doute le volcan Toba, sur l'île de Sumatra en Indonésie, qui a connu sa dernière éruption — la plus importante — il y a 74 000 ans. Cet événement majeur est à l'origine de la « théorie de la catastrophe de Toba ». L'éruption, qui a engendré une chute des températures d'environ 3 à 15 °C durant à peu près une décennie, aurait été suivie d'un âge glaciaire d'environ mille ans. En 1998, Stanley Ambrose, anthropologue à l'université de l'Illinois (États-Unis), a théorisé l'idée que cette éruption ait pu générer un véritable goulot d'étranglement génétique, qui aurait éradiqué les autres espèces d'hominidés coexistant avec *Homo sapiens*. Quelques milliers d'individus de ses derniers représentants auraient alors survécu en Afrique orientale. Nous en serions les descendants. Cette théorie est aujourd'hui le sujet d'âpres discussions scientifiques.

Retour à Naples, où la pression volcanique se manifeste ces derniers temps. La ville compte 3 millions d'habitants, dont 500 000 vivent dans la caldeira du supervolcan. Sont-ils prêts à évacuer à la première alerte ? « *Pendant des années, j'ai averti de l'absence de plan d'urgence et d'évacuation pour les champs Phlégréens,* souligne Giuseppe Mastrolorenzo. *Lorsqu'il a finalement été réalisé, il y a environ huit ans, je l'ai immédiatement dénoncé tant il est inadéquat : trop optimiste, sans base scientifique valable, il suppose que l'éruption sera tout au plus de taille moyenne, alors que, selon les preuves des éruptions passées, il faut envisager au moins une éruption qui mettrait en danger environ trois millions de personnes et non pas les seules personnes incluses dans la zone rouge du plan d'urgence !* » Le péril volcanique est aujourd'hui une réalité en Europe. ■ **S. R.**

GIUSEPPE MASTROLORENZO

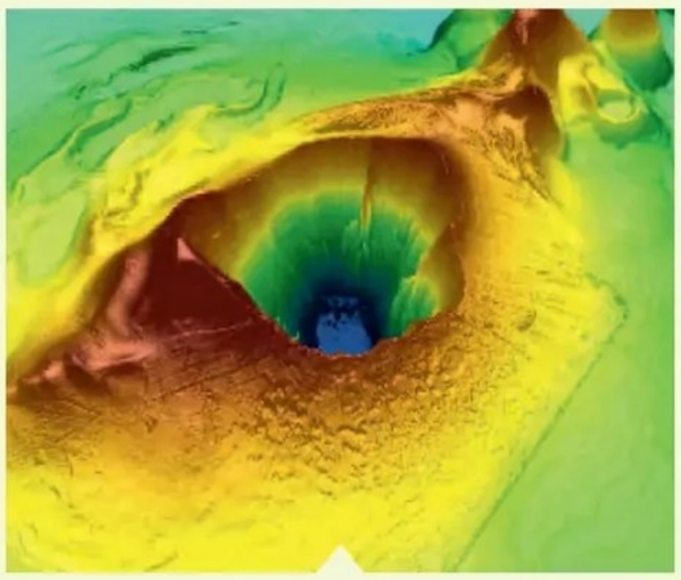
« Il faut envisager une éruption des champs Phlégréens qui mettrait en danger environ trois millions de personnes »

Giuseppe Mastrolorenzo, volcanologue à l'Institut national de géophysique et de volcanologie, à Rome

ÉRUPTIONS SOUS-MARINES

La poudrière de la mer Égée

En Méditerranée orientale, à 8 km de l'île de Santorin (Grèce), s'élève le volcan sous-marin Kolumbo, dont le cratère de 1,5 km de diamètre affleure à une dizaine de mètres seulement de la surface. À l'instar du volcan de Santorin, il fait partie de l'arc égéen qui marque la zone de subduction de la plaque tectonique africaine sous la plaque égéenne, à l'origine du volcanisme très actif de la région. De nouveaux enregistrements sismiques en octobre 2022 ont montré que sa chambre avait accumulé une forte quantité de magma, estimée à 1,4 km³, depuis l'éruption explosive de 1650. À cette époque, environ 2 km³ de magma avaient été mobilisés par l'éruption, produisant 60 km³ de matériaux volcaniques. Au rythme actuel de remplissage, la chambre devrait contenir 2 km³ d'ici à 150 ans et pourrait produire une éruption dévastatrice. La rencontre du magma et de l'eau pourrait propulser des matériaux à des dizaines de kilomètres d'altitude, à l'exemple de l'éruption de janvier 2022 du Hunga Tonga (archipel des Tonga, Pacifique), qui a recouvert de cendres les îles voisines.


SANTORY, NOMIKOU ET AL., 2022

Le volcan sous-marin Kolumbo, à 8 km de Santorin (modélisation 3D).

Le 6 février 2023, deux séismes ont frappé la Turquie et la Syrie, faisant plus de 50 000 victimes et des milliers de bâtiments détruits.

CEM BAKIRCI/DEPO/ROPI-REA

SÉISMES

À quand le prochain « Big One » ?

Les récents tremblements de terre meurtriers au Maroc ou en Turquie rappellent que la science peine encore à prévoir ces phénomènes complexes, même si les instruments de mesure se perfectionnent.

C'était il y a tout juste un siècle. Le 1er septembre 1923, le Japon subit le séisme le plus meurtrier de son histoire. Un tremblement de terre de magnitude 7,9 dévaste la capitale et déclenche un tsunami. Près de 2 millions de personnes se retrouvent sans abri et 142 000 décèdent. Cent ans plus tard, Tokyo doit rester vigilante, car elle attend le prochain « Big One ». Selon une étude de l'agence météorologique japonaise, il y a 70 % de risque qu'un mégaséisme éclate d'ici à trente ans. L'inquiétude n'est pas moins grande en Californie, aux États-Unis. Surtout dans la région de San Francisco, où le dernier séisme majeur s'est produit en 1906. Selon l'institut d'études géologiques américain (USGS), la fréquence d'une telle catastrophe y est d'environ une fois tous les 200 ans. Mais l'USGS estime à 67 % la probabilité d'un événement de magnitude 7 dans les trente prochaines années!

La compréhension de l'origine de ces phénomènes remonte à un peu plus d'un demi-siècle, avec la découverte de la tectonique des plaques. La partie externe du globe, la lithosphère, est constituée de plaques en mouvement les unes par rapport aux autres. Au Japon et en Californie, les séismes sont fréquents, car ces régions se situent

à la limite de plusieurs plaques tectoniques. Cependant, les forces de friction empêchent ces plaques de se déplacer. Elles demeurent ainsi bloquées jusqu'à ce que l'énergie accumulée déclenche une rupture, habituellement le long d'une faille préexistante. L'énergie est alors libérée sous forme d'ondes sismiques : le tremblement de terre. « *Ensuite, la faille va se resceller à cause de la friction. Puis, la tension va recommencer à s'accumuler jusqu'à ce qu'un prochain séisme se déclenche, c'est pourquoi on parle de cycle sismique* », détaille Richard Walker, professeur de tectonique à l'université d'Oxford (Royaume-Uni).

Le phénomène insoupçonné des séismes lents

Les données historiques sont essentielles pour analyser la fréquence des séismes et évaluer les aléas sismiques. Depuis une trentaine d'années, les satellites révolutionnent le monde de la sismologie. Grâce aux données GPS et à l'interférométrie radar (InSAR), les scientifiques peuvent maintenant suivre le mouvement des plaques et la déformation de la croûte autour des failles au millimètre près ! Ils ont accès à des données de plus en plus précises pour évaluer la contrainte mécanique accumulée dans une faille, qui est un bon indicateur du risque sismique.

Ces technologies ont également permis la découverte d'un phénomène insoupçonné, observé pour la première fois au Japon en 1999 : les séismes lents. « *C'est le même type de mouvement qu'un séisme ordinaire, mais il se produit sur plusieurs jours ou semaines, et ne génère aucune onde sismique dangereuse* », indique le sismologue Harold Tobin, professeur à l'université de Washington, aux États-Unis. D'où de nouvelles questions : qu'est-ce qui contrôle la friction dans une faille ? Pourquoi parfois des ruptures et d'autres fois des glissements lents ? Il manque encore des informations sur le phénomène, car une panoplie de facteurs entrent en cause. Notamment la lithologie, la géométrie des plaques et la pression des fluides dans les pores des roches, indique une étude japonaise publiée à l'automne 2023.

Pour comprendre ces mécanismes, les géologues — principalement des équipes américaines et japonaises — creusent dans les failles pour récolter des échantillons de roches et des mesures directes de la tension. Par exemple, trois importantes missions de forage se sont penchées sur la faille de Nankai, située au large du Japon et que l'on soupçonne d'être à l'origine d'un éventuel mégaséisme. Lors de la dernière mission en 2018, une équipe internationale a creusé à plus de 3 kilomètres de profondeur dans la croûte terrestre sous l'océan.

La vaste majorité des séismes se produisent aux limites des plaques tectoniques, où se concentre la majeure partie des tensions. Les tremblements de terre les plus puissants se déclenchent dans la ceinture de feu du Pacifique, caractérisée par des zones de subduction. Plus rarement, les séismes peuvent aussi survenir à l'intérieur des plaques, notamment là où se trouvent d'anciennes failles qui n'ont pas encore été détectées. « *Les failles ne présentent pas toujours de signes évidents à la surface* », précise Harold Tobin. Mais grâce au Lidar, une méthode de télédétection aérienne au laser qui permet de mesurer la topographie de la Terre « à nu » et dans ses moindres détails, on découvre de nouvelles failles chaque année depuis dix ans. « *Avec le Lidar, on peut voir à travers la végétation et ainsi détecter des failles dont on ignorait l'existence* », s'émerveille le sismologue américain. C'est de cette manière que des chercheurs coréens ont découvert en 2022 une faille inconnue en pleine forêt.

Par ailleurs, les sismologues évaluent la force des événements passés pour défi-

TRAITEMENT DES DONNÉES

Mobilisation pour accélérer la détection précoce des tsunamis

Une série de vagues pouvant s'élever à plus 30 mètres qui déferlent à la vitesse d'un cheval au galop sur les côtes : les tsunamis sont parmi les catastrophes naturelles les plus destructrices. Selon une étude publiée par des géologues américains en 2022, les tsunamis sont d'origine sismique dans 80 % des cas. Mais ils peuvent aussi être déclenchés par des glissements de terrain sous-marins ou des éruptions volcaniques. Ils surviennent principalement dans les zones de subduction, situées à de faibles profondeurs. Depuis les tsunamis de 2004 dans l'océan Indien (230 000 morts) et de 2011 au Japon (22 000 morts), la communauté scientifique s'est mobilisée pour atténuer les conséquences de telles catastrophes. Les stratégies de détection précoce se sont développées au cours des dernières années, notamment grâce aux avancées en traitement de données. Par exemple, le Japon a installé un vaste réseau de manomètres dans le fond marin au large de ses côtes. Des modèles numériques analysent ces données en temps réel et peuvent alors détecter rapidement le déclenchement d'un tsunami : une information précieuse qui permet de donner le temps aux communautés d'évacuer.

JIJI PRESS/AFP

◀ **Le 11 mars 2011,** un séisme sous-marin engendra un tsunami sur la côte nord-est du Japon (ici à Miyako), provoquant l'accident nucléaire de Fukushima.

nir avec plus de précision les zones à risque. Même si l'échelle de Richter est encore familière du grand public, elle n'est plus utilisée dans la communauté scientifique depuis les années 1970 et a laissé sa place à la notion de magnitude, une mesure universelle de la quantité d'énergie libérée. « *La magnitude se mesure sur une échelle logarithmique,* explique Harold Tobin. *Un séisme de magnitude 8 dégage des ondes sismiques dix fois plus fortes qu'un séisme de magnitude 7 et libère une quantité d'énergie 30 fois plus élevée.* » On considère qu'un tremblement de terre peut causer de sérieux dommages aux bâtiments à partir d'une magnitude de 6. Et à une magnitude 8, l'énergie libérée est 900 fois plus grande!

Cette mesure demeure cependant insuffisante pour présager du caractère destructeur d'un séisme : il faut y adjoindre la géologie locale, la distance vis-à-vis de l'épicentre ainsi que la profondeur de l'hypocentre — aussi appelé foyer, c'est-à-dire le lieu de la rupture. Ces données permettent de déterminer l'intensité d'un séisme. Plus on se trouve près de la source de celui-ci, plus les secousses seront fortes et dangereuses. « *Les ondes sismiques les plus dommageables se situent dans les hautes fréquences,* souligne Richard Walker, *mais ces ondes se dissipent rapidement selon la distance qu'elles parcourent. Dans le cas d'un séisme plus profond, une grande quantité de l'énergie sera déjà estompée avant d'atteindre la surface.* » Par exemple, le foyer du séisme qui a frappé le Maroc en septembre dernier était situé à seulement 18 km de profondeur — ce qui est considéré comme très peu profond — et l'épicentre, à 71 kilomètres de Marrakech, une des plus villes les plus peuplées du pays. L'intensité du séisme y était donc assez forte et c'est pourquoi elle a subi autant de dégâts.

Les répliques peuvent elles aussi être dévastatrices

De plus, un séisme peut devenir encore plus dévastateur lorsqu'il est accompagné de répliques, c'est-à-dire de secousses secondaires. « *Elles se produisent quand le choc du séisme transfère du stress aux parties adjacentes de la faille, ce qui déclenche d'autres tremblements de terre* », précise Harold Tobin. C'est ce qui est arrivé en Turquie et en Syrie en février 2023 : une réplique de magnitude 7,5 a frappé quelques minutes après la secousse principale de magnitude 7,8. De nombreux bâtiments, déjà affaiblis, se sont écroulés et le bilan humain a été catastrophique. « *Le risque dépend aussi de la résilience des populations,* estime Richard Walker. *Est-ce que les infrastructures sont adéquates? Est-ce que la communauté est prête? C'est peut-être même l'aspect le plus important parce que ce sont des choses sur lesquelles il est possible d'agir.* » ■

S. C.

UNIVERSITHY OF WASHINGTON

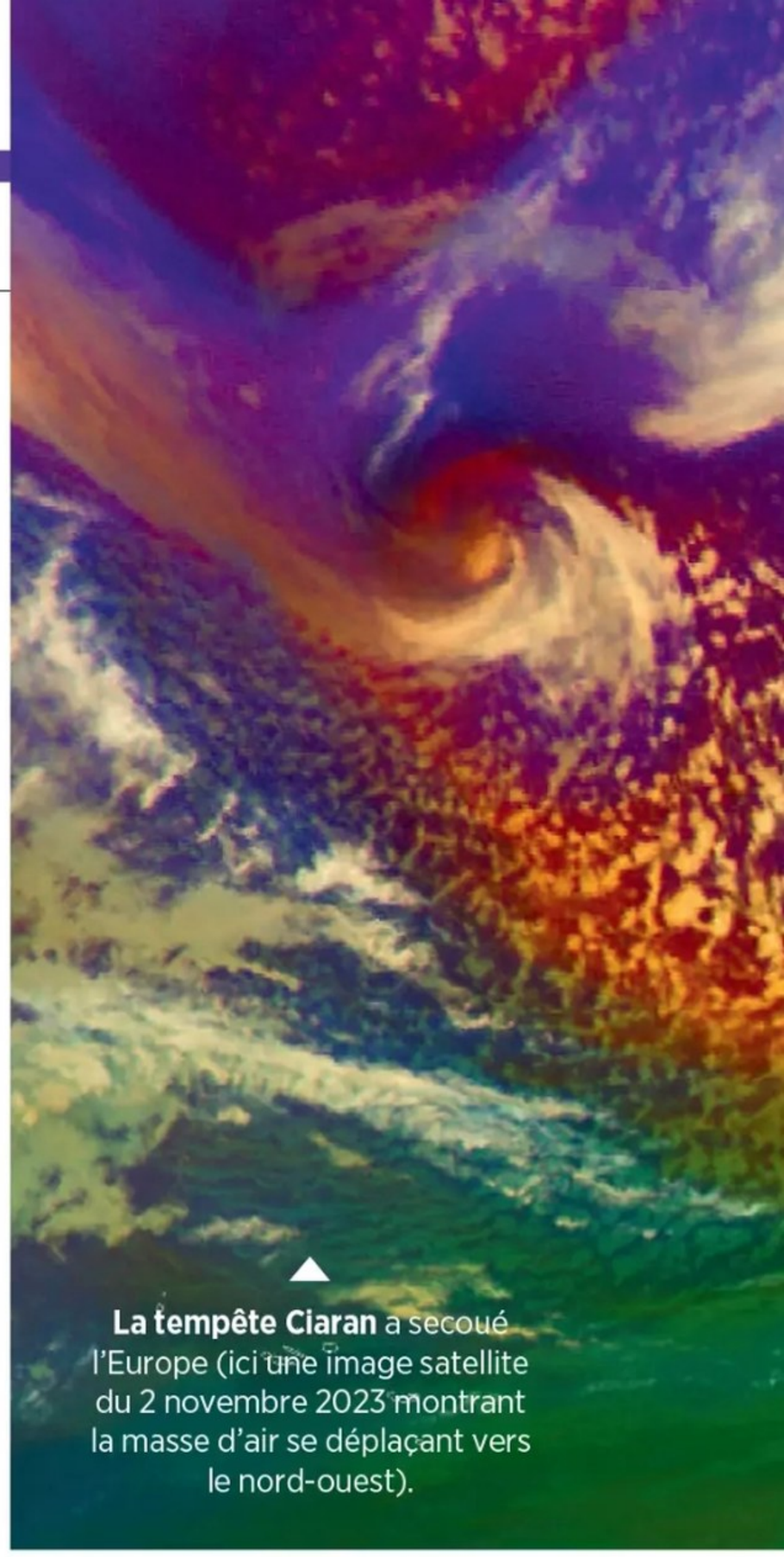
« Avec le Lidar, on peut voir à travers la végétation et ainsi détecter des failles dont on ignorait l'existence »

Harold Tobin, sismologue, professeur à l'université de Washington, aux États-Unis

TEMPÊTES

La nouvelle ère des bombes météo

Un « rail de dépressions » s'est abattu cet automne sur la France et l'Europe de l'Ouest avec deux tempêtes qui ont marqué les esprits, Ciaran et Domingos. Les nouveaux outils de modélisation numérique permettent d'évaluer la force de l'événement et sa trajectoire pour affiner les messages de prévention auprès des populations.



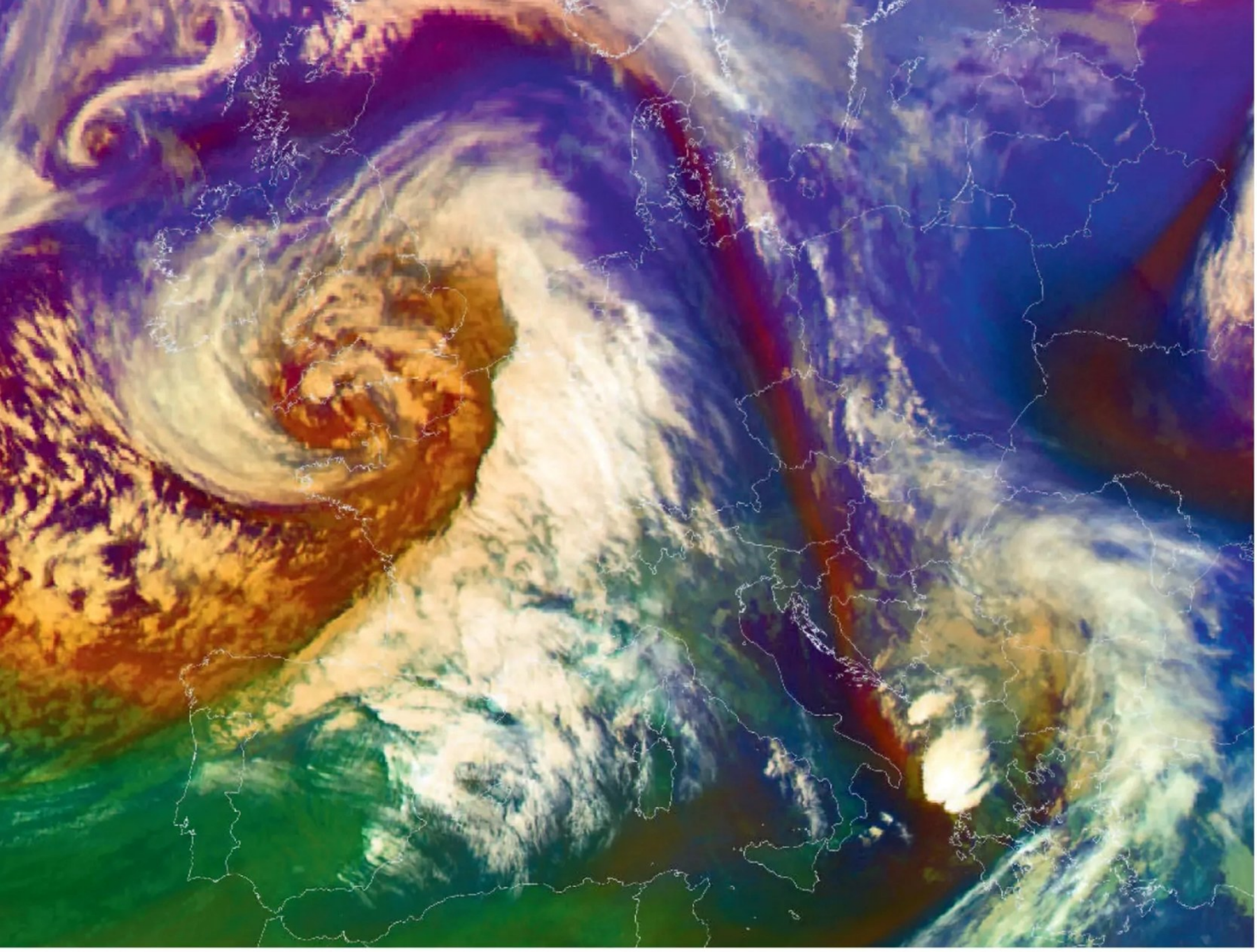
La tempête Ciaran a secoué l'Europe (ici une image satellite du 2 novembre 2023 montrant la masse d'air se déplaçant vers le nord-ouest).

Records de pluies, records de vents. L'automne 2023 restera dans les annales météorologiques. Entre le 18 octobre et le 16 novembre, Météo France a constaté un cumul moyen de précipitations sur l'Hexagone de 237,3 mm. Jamais de telles quantités de pluie n'avaient été mesurées. La station de Saint-Tricat à Calais a même enregistré un cumul de 268,4 mm entre le 1er et le 20 novembre, expliquant ainsi les inondations catastrophiques du Pas-de-Calais. Le jeudi 2 novembre, le vent a soufflé à 170 km/heure à Lanvéoc (Finistère), battant le précédent record de 1987 de 8 km/h. Toute la Bretagne a subi une tempête de courte durée mais d'une extrême intensité : une « bombe » météorologique.

Pour comprendre le « rail de dépressions » que la France et l'Europe de l'Ouest ont subi et les deux fortes tempêtes qui l'ont ponctué — Ciaran et Domingos —, il faut remonter à la fin de l'été. « *Jusqu'à la mi-octobre, les températures sur la France ont été anormalement élevées,* rappelle Olivier Proust, prévisionniste à Météo France. *Les températures des eaux de surface de l'Atlantique Nord-Ouest étaient également bien supérieures à la moyenne, ce qui a constitué un réservoir d'énergie quand les conditions météo ont changé.* » Cet incroyable été indien constitue déjà en lui-même un record climatique. « *Nos analyses comparatives avec des saisons automnales similaires montrent que cette vague de chaleur est de 1,5 à 4 °C supérieure à celles qui ont été mesurées par le passé* », constate Davide Faranda, climatologue au Laboratoire des sciences du climat et de l'environnement (LSCE). Ces eaux chaudes, c'est le moteur qui explique les désastres à venir. L'évaporation a été en effet plus intense, les teneurs en vapeur d'eau dans l'atmosphère sont restées élevées. Toute cette masse d'humidité représente des pluies en devenir. Le 15 octobre, bascule de temps. Les masses d'air froid du pôle Nord descendent à la rencontre des zones chaudes subtropicales. « *Le déséquilibre des températures dans l'atmosphère se résout par un affrontement chaotique des masses d'air destiné à retrouver l'équilibre antérieur, provoquant un front météorologique à l'origine des dépressions* », poursuit Olivier Proust.

Le « courant-jet », accélérateur de puissance des dépressions

Du fait de la rotation de la Terre, ces dépressions se déplacent de l'ouest vers l'est. Dans l'hémisphère Nord, ce phénomène est courant. On dénombre ainsi une quarantaine de « bombes météo » parmi les dizaines de dépressions classiques annuelles apportant pluies et vents à l'Europe de l'Ouest entre septembre et mars. C'est ainsi que se rechargent les nappes phréatiques, dans cette saison hivernale où l'eau n'est pas accaparée par la végétation. Système bénéfique, donc. Sauf quand il devient extrême. C'est-à-dire quand une dépres-



EUMETSAT

sion rencontre un vent puissant d'altitude, le « courant-jet ». À 10 kilomètres d'altitude, ce vent se présente comme un « tube » de 100 à 200 kilomètres de large, de deux kilomètres d'épaisseur, qui souffle en moyenne à 200 km/h mais peut doubler sa vitesse. Le courant-jet naît aux alentours de Terre-Neuve, traverse l'Atlantique Nord et perd de sa vitesse quand il atteint le continent européen, au-dessus duquel il se dissipe. Il naît le long des fronts dépressionnaires par l'effet de vents verticaux qui, aux hautes altitudes, vont créer ce courant plus fort que les zones l'entourant. *« C'est quand il perd rapidement de sa vitesse à l'approche des terres dans le golfe de Gascogne que le courant-jet devient un formidable accélérateur de la puissance des dépressions »*, décrit Olivier Proust. Lorsque le courant-jet se déplace, l'air s'accumule à son approche, puis se dissipe quand il est passé. Il « aspire » ainsi l'air turbulent de la dépression, diminuant encore plus la pression atmosphérique sur l'océan. La dépression se creuse d'autant plus vite que le courant-jet est puissant. Pour que le phénomène mérite la dénomination de « bombe » et ne soit pas confondu avec des dépressions de forte intensité, il faut que la pression centrale de la dépression baisse de 24 hectopascals (hPa) en 24 heures, selon les critères scientifiques stricts développés par le météorologue suédois Tor Bergeron dans les années 1950. Cette brusque baisse de pression est à l'origine du renforcement des vents et du gonflement des eaux de surface de l'océan pouvant provoquer des submersions marines. En 2010, les inondations catastrophiques en Charente-Maritime et en Vendée ont ainsi été provoquées par la coïncidence de l'arrivée de la dépression et de la montée du niveau des mers au moment d'une marée haute qui n'avait pourtant pas un coefficient élevé.

IDENTIFICATION

Comment sont nommées les tempêtes

Pourquoi Ciaran, Domingos ? Les noms donnés aux tempêtes dépendent de trois groupes de service météo : « Europe occidentale » (Irlande, Royaume-Uni et Pays-Bas) ; « Europe du Sud-Ouest » (Portugal, Espagne, France et Belgique) et « Europe du Nord et centrale » (les autres pays européens). En juin de chaque année, chaque groupe produit sa propre liste par ordre alphabétique et c'est le premier service météo qui détermine qu'une dépression devient suffisamment importante pour être nommée qui choisit son nom. Ainsi, Ciaran a été distingué par l'Irlande, d'où le prénom gaélique, et Domingos par le Portugal. La prochaine tempête pourrait s'appeler Elin (groupe anglo-saxon), Elisa (groupe franco-ibérique), ou Emil (Europe centrale), selon son découvreur.

DASSAEV TELLEZ ADAME/XINHUA/ REA

En 24 heures, Otis est passé du statut de tempête tropicale à celui d'ouragan, avec des vents à 260 km/h s'abattant sur Acapulco (Mexique), le 25 octobre 2023.

GESTION DES RISQUES

L'ouragan à Acapulco n'avait pas été prévu

Moins de victimes, moins de dégâts. Le « cadre de Sendai pour la réduction des risques de catastrophes naturelles » incite les 195 États membres de l'ONU à se doter de moyens de prévention des effets des tempêtes, inondations, tsunamis, séismes affectant leur population d'ici à 2030. Chaque pays doit évaluer les risques liés à sa géographie, élaborer des plans de prévention des impacts et préparer des plans de gestion de crise. L'alerte et les moyens d'évaluation déployés sont donc essentiels. En témoigne l'ouragan Otis qui a frappé la ville mexicaine d'Acapulco le 25 octobre dernier. En 24 heures, pour des raisons météo qui restent à éclaircir, les vents sont passés de 85 à 260 km/h. Les modèles numériques de prévision sont passés à côté de ce phénomène brutal car un seul vol de reconnaissance a pu être effectué et la région est dépourvue de radar météorologique. Les actions de prévention se sont donc révélées ici totalement insuffisantes.

▶ Le caractère exceptionnel de Ciaran a été détecté par les services météorologiques trois jours avant son arrivée sur les côtes européennes. Un laps de temps qui a permis de prévenir les populations bien en amont pour sécuriser les biens et prendre des dispositions pour éviter de se déplacer au moment du passage de la tempête. « *Nous bénéficions désormais d'outils puissants tels que l'imagerie satellite, en particulier la modélisation numérique, qui nous permettent d'évaluer la force de l'événement et surtout sa trajectoire pour affiner au mieux les messages de prévention auprès des populations* », note Olivier Proust. Nourris par des mesures *in situ* et par les observations des événements passés, les modèles numériques n'ont cessé de gagner en vitesse de calcul et en précision géographique. Le modèle Arpège, utilisé depuis le milieu des années 1990 par Météo France, actualise toutes les six heures les paramètres de pression au niveau de la mer, de température, d'humidité relative et de vitesse du vent à une maille de dix kilomètres. Il sert de base aux prévisions météo données dans les médias. Le modèle Arome constitue une sorte de loupe d'Arpège par sa précision d'un kilomètre qui permet de prévoir des événements très localisés comme une cellule orageuse ou les fortes pluies concentrées des « épisodes cévenols », responsables d'inondations brutales à l'automne dans le pourtour méditerranéen.

Météo France ne cesse de faire évoluer ses algorithmes, et tous les services météo européens bénéficient par ailleurs d'une coopération renforcée. « *La puissance de calcul dont nous disposons désormais permet de faire tourner plusieurs modèles ensemble et directement pour déterminer statistiquement la trajectoire la plus probable du phénomène* », précise Olivier Proust.

C'est ce qu'on appelle la prévision probabiliste, dont un modèle européen tourne à Bologne (Italie) grâce à la coopération des 26 États membres. Au moment où Ciaran est détecté et nommé *(lire l'encadré p. 41)*, trois jours avant son arrivée, la zone « d'atterrissage » est encore très imprécise entre les îles Britanniques et le sud du golfe de Gascogne. Au fil des heures, les algorithmes de dizaines de modèles ont déterminé statistiquement la trajectoire la plus probable. Le niveau de vigilance rouge a ainsi pu être émis dans les trois départements de la pointe bretonne le 1er novembre à 6 heures pour un début de tempête le 2 novembre à minuit. Près de deux jours pour diffuser l'information, prévenir les populations, se préparer à d'éventuels impacts. Cela n'empêchera pas la destruction quasi-totale du réseau électrique, mais limitera le bilan humain à deux victimes.

Le volume des pluies va croître fortement selon le Giec

Ciaran fait partie des cinq plus fortes tempêtes subies par la Bretagne ces dernières décennies, la deuxième derrière « l'ouragan » de 1987, que les techniques de prévision d'alors n'avaient pu anticiper. Ces désastres vont-ils se multiplier à l'avenir avec le changement climatique? Le sixième rapport d'évaluation du Giec (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat), remis en 2022, n'affirme pas que la fréquence des « bombes » va augmenter. « *En revanche, avec des eaux de surface plus chaudes et une humidité atmosphérique plus importante, le volume de pluies va, lui, croître fortement* », assure Olivier Proust. Dans l'avenir, l'Europe devrait connaître des précipitations plus intenses, plus courtes. Et plus ravageuses. ■ **L. C.**

METEO FRANCE

« La modélisation numérique nous permet d'évaluer la force de l'événement et sa trajectoire »

Olivier Proust, prévisionniste à Météo France

FRANCE

La crainte d'un séisme destructeur

Le fort tremblement de terre de l'été 2023 dans la région de La Rochelle a surpris car il a frappé une zone à risque modéré. Sismologues et géologues vont devoir affiner leurs outils de détection des failles.

COLLECTION DUPONDT / AKG IMAGES

THIBAUD MORITZ / AFP

Le séisme de Lambesc du 11 juin 1909, de magnitude 6,2, a touché le sud-est de l'Hexagone (à gauche) ; celui du 16 juin 2023, de magnitude 5,3, l'ouest (ci-dessus à La Laigne).

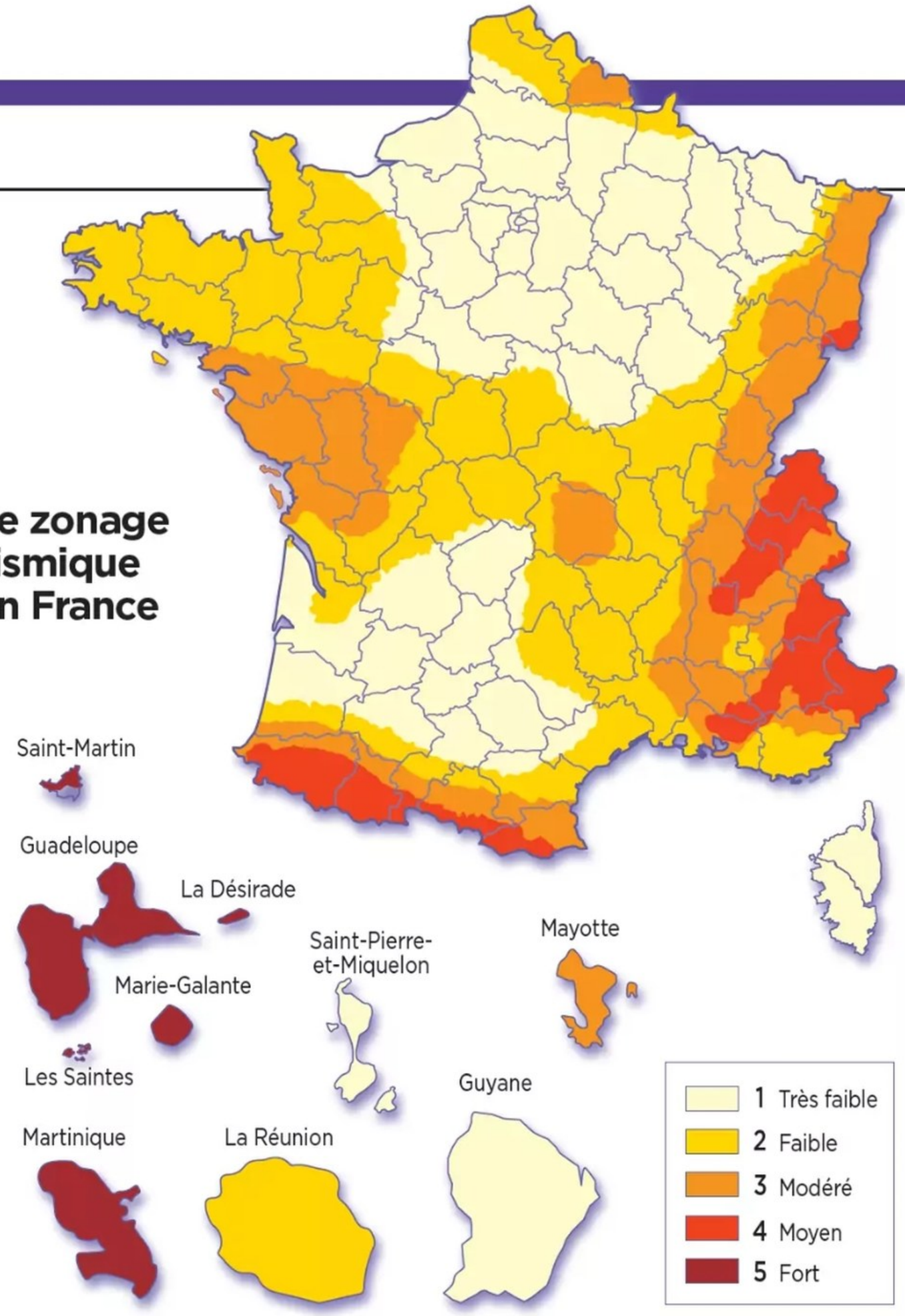
Le 16 juin 2023, un séisme a fait trembler tout l'ouest de la France. Les secousses ont été ressenties jusqu'à Rennes, Caen, Le Mans ou encore Bordeaux. Situés à l'épicentre à une trentaine de kilomètres à l'est de La Rochelle, en Charente-Maritime, les villages de La Laigne et de Cram-Chaban ont été les plus touchés. On n'y a déploré, par chance, aucune victime et seulement un blessé léger, « *bilan qui aurait pu être bien plus lourd si le tremblement de terre s'était produit au milieu de la nuit* », indique Éric Beucler, sismologue au Laboratoire de planétologie et géosciences de Nantes Université. Car plus de 200 habitations ont été fortement endommagées : elles ont été classées « rouges » — trop dangereuses pour y vivre — voire « noires », c'est-à-dire inaccessibles et ne pouvant être reconstruites. Au total, 20 communes de Charente-Maritime et des Deux-Sèvres ont été reconnues en état de catastrophe naturelle pour plus de 21 000 personnes sinistrées. Il faut dire que ce séisme était particulièrement fort : 5,3 de magnitude locale. « *Un type d'événement assez rare en France métropolitaine, qui ne se produit qu'une à deux fois tous les dix ans* », souligne Éric Beucler. Il a été vécu, par ailleurs, comme une surprise totale à La Laigne et Cram-Chaban où rien de tel n'avait jamais été

enregistré… et où aucune faille active n'était connue jusqu'à présent. De quoi raviver l'inquiétude des Français vivant notamment dans les zones à risque. Comment celles-ci sont-elles établies et catégorisées sur le territoire national ? Un séisme très destructeur, comme celui de magnitude 7 qui a frappé le Maroc en septembre dernier, pourrait-il un jour se produire ?

L'outre-mer bien plus exposé que l'Hexagone

La France métropolitaine et la France d'outre-mer doivent être clairement distinguées. Les risques sismiques y sont en effet très différents, en nature comme en intensité. Pour l'outre-mer, ce sont les îles antillaises (Martinique, Guadeloupe, Marie-Galante, Saint-Martin…) qui sont les plus exposées. Elles se situent en effet le long d'une zone de subduction, là où les plaques tectoniques nord-américaine et sud-américaine s'enfoncent sous la plaque caraïbe à une vitesse d'environ 2 centimètres par an. « *L'archipel des Antilles a été formé par ces mouvements de plaques. Un processus qui engendre aussi du volcanisme et de puissants séismes dans toute la région* », rappelle Jérôme Vergne, de l'Institut Terre et environnement de Strasbourg (Ites). Des tremblements de terre y sont mesurés ainsi de façon très régulière : certains de grande puissance comme en 2007 lorsqu'une secousse de magnitude 7,4 a été enregistrée au large de la Martinique, sans faire de victimes heureusement. Mais en 1843, un séisme de magnitude probablement supérieure à 8 a entraîné la mort de plus de 3000 personnes en Guadeloupe.

Le zonage sismique en France



Depuis 2011, le territoire français a été découpé en 5 niveaux d'aléas sismiques, établis à partir de la recension des failles et des données recueillies sur de précédents séismes.

BRUNO BOURGEOIS - SOURCE : IRSM

L'activité sismique est beaucoup moins forte sur le territoire hexagonal, situé sur « *une zone continentale stable loin des limites de la plaque Eurasie, les côtes françaises en Méditerranée se situant par exemple à des centaines de kilomètres de la plaque africaine* », explique Éric Beucler. Il est traversé néanmoins par de nombreuses failles héritées du passé géologique de la plaque eurasienne. Même si les taux de déformation tectonique sont faibles (moins de 1 millimètre par an), des contraintes s'accumulent dans ces structures de plusieurs dizaines voire centaines de kilomètres de long qui incisent le sous-sol. En se libérant, elles produisent chaque année plus de 4000 séismes détectés par le réseau sismologique et géodésique français (Epos-France). L'écrasante majorité dépasse à peine la magnitude 2, donc est quasiment imperceptible. Ceux de magnitude 3, sensibles à une échelle locale, se produisent en moyenne une fois par mois ; et pour la magnitude 4, dont les effets se ressentent schématiquement au

EOST-ITES

« Le séisme de Lambesc est un événement de référence pour l'Hexagone, le plus dévastateur qui ait été documenté »

Jérôme Vergne, chercheur à l'Institut Terre et environnement de Strasbourg (Ites)

niveau départemental, une à deux fois par an. Quant aux épisodes de magnitude 5, comme celui de La Laigne, pouvant toucher une région entière, ils se manifestent ainsi jusqu'à deux fois par décennie.

Beaucoup plus inquiétants et destructeurs, les séismes de magnitude 6 surgiraient environ une fois par siècle. À l'instar de celui survenu en 1909 autour de Lambesc (Bouches-du-Rhône), qui fit 48 victimes en détruisant des milliers d'habitations. « *C'est le dernier gros séisme en France métropolitaine,* relève Jérôme Vergne. *Et pour nous un événement de référence, le plus dévastateur qui ait été documenté.* » Car même si les stations d'enregistrement étaient encore peu nombreuses en Europe, les ondes sismiques ont pu être mesurées par plus de 30 sismomètres dans un rayon de 2000 kilomètres autour de l'épicentre.

Des zones de sismicité plus importantes corrélées au relief

Des tremblements de terre encore plus énergétiques pourraient néanmoins se produire. Au milieu du XIVe siècle, un séisme qui aurait approché la magnitude 7 a en effet dévasté Bâle, au niveau de la frontière franco-suisse actuelle entre les Vosges, la Forêt-Noire et le Jura, y faisant des centaines de victimes « *Une telle catastrophe pourrait se reproduire,* avertit Jérôme Vergne. *Mais en raison de très faibles occurrences et du manque de statistiques, il est extrêmement difficile d'avancer une période de retour. Tous les 500 ans ou 10 000 ans, personne ne peut aujourd'hui le prédire.* »

C'est en se fondant sur d'importants jeux de données et une approche probabiliste que l'aléa sismique est effectivement établi. « *Il traduit, en substance, la possibilité qu'une secousse tellurique dépasse certains seuils sur un site particulier au cours d'un laps de temps. On prend ainsi en considération une gamme très large de scénarios pondérés selon leur probabilité d'occurrence* », note Éric Beucler. Grâce à cette méthode, le territoire français est découpé depuis 2011 en cinq types d'aléas : très faible, faible, modéré, moyen ou fort, qui déterminent notamment les règles de constructions parasismiques *(voir la carte ci-contre)*. Seules les Antilles sont classées dans la catégorie la plus dangereuse. Et dans l'Hexagone, les zones de sismicité modérée à moyenne sont toutes corrélées au relief — les régions alpines, les Pyrénées ainsi que le fossé rhénan, et dans une moindre mesure les Massifs central et armoricain. « *Pour élever des montagnes, il faut nécessairement casser des roches et donc créer des failles, même si la majeure partie des déformations s'effectue à grande profondeur* », signale Éric Beucler. Les risques sismiques sont ainsi particulièrement élevés dans le sud-est de la France au niveau des Alpes, où la microplaque italo-adriatique — associée

CADAM-CEA

VERBATIM

HÉLÈNE HÉBERT

GÉOPHYSICIENNE AU CEA ET COORDINATRICE NATIONALE DU CENTRE NATIONAL D'ALERTE AUX TSUNAMIS

« Un gros tsunami d'ici à 30 ans sur nos côtes »

“Ce sont surtout les Antilles et la Polynésie françaises qui sont exposées à des tsunamis de grande ampleur. Les îles antillaises se situent en effet sur une zone de subduction où des séismes de magnitude 8 sont possibles, engendrant alors des vagues de plusieurs mètres de haut. Un événement de ce type se serait produit au XIVe siècle. Les Antilles constituent ainsi un point d'inquiétude, avec des délais très brefs pour évacuer puisque la source sismique est très proche. La Polynésie se trouve, elle, au milieu de l'océan Pacifique entouré par la « ceinture de feu ». Donc à des milliers de kilomètres des zones sismogènes, mais sur le chemin des nombreux tsunamis que celles-ci génèrent. Si les délais sont dans ce cas de 8 à 9 heures, la topologie des sites polynésiens amplifie toutefois les tsunamis, dans l'archipel des Marquises particulièrement. Ils peuvent créer des vagues de plus de 5 mètres, et ce plusieurs fois par siècle. Si les phénomènes ne sont pas comparables, l'Hexagone pourrait aussi être touché. Lors du tremblement de terre de Lisbonne, au Portugal en 1755, un tsunami avait submergé sous 5 à 10 mètres d'eau des portions des littoraux marocain et espagnol. Et provoqué des inondations en Bretagne, indiquent les simulations. Mais les risques concernent surtout nos côtes méditerranéennes où un gros tsunami a 100 % de chance de se produire d'ici à 2050, selon l'Unesco. Nous travaillons en particulier sur deux scénarios. Le premier implique un séisme de magnitude 7 à 7,5 en Algérie. Une heure et demie plus tard, il engendrerait des vagues de 2 à 3 mètres dans le port de Sète notamment, suscitant des courants d'eau de 40 km/h. Autre source de préoccupation : un séisme de magnitude 6,5 à 7 au large de Nice, qui s'est déjà produit en 1887. Le temps de réaction ne serait alors que de dix minutes environ. Avec des conséquences potentiellement désastreuses, surtout en été lorsque les plages sont bondées.”

Propos recueillis par F. D.

à la plaque africaine — continue de se poinçonner dans la plaque eurasienne. Ils sont en revanche quasiment nuls dans les bassins sédimentaires parisien et aquitain. Seuls de rares microséismes ont été jusqu'à présent mesurés.

Le zonage sismique de la France pourrait être cependant affiné. Le séisme de La Laigne l'illustre parfaitement. Même s'il s'est produit dans une région où l'aléa est modéré, il a été engendré par une faille insoupçonnée jusqu'alors, « *un peu au sud des régions où l'on enregistrait une sismicité régulière et qui sont gouvernées par l'héritage du massif armoricain, très actif il y a 350 millions d'années* », précise Jérôme Vergne. Pas de discontinuités rocheuses, de cours d'eau déviés ou de restes d'une montagne : cette faille n'avait laissé aucune trace visible dans le paysage car elle est recouverte d'une couche de sédiments de plusieurs centaines de mètres d'épaisseur. La quinzaine d'instruments installés dès le lendemain du séisme par une équipe nantaise a permis toutefois de la dévoiler. En enregistrant ses répliques, ils ont montré qu'une surface de faille de 6 km² s'était déplacée de plusieurs centimètres à une profondeur comprise entre 4 et 8 km. Présentés lors des premières rencontres Epos-France organisées en novembre dernier à Saint-Jean-Cap-Ferrat (Alpes-Maritimes), ces résultats conduisent à ajouter « *un trait supplémentaire et un nouveau site à surveiller dans l'atlas sismique de la France* », annonce Éric Beucler.

Près de 180 stations installées sur tout le territoire

Des progrès considérables ont été réalisés, de fait, depuis une quinzaine d'années. À la fin des années 2000, la France ne possédait qu'une quarantaine de stations sismiques de grande précision, surtout dans les Alpes et les Pyrénées. C'est avec les données recueillies par ce dispositif que le zonage actuel a été d'ailleurs établi. Mais grâce à un vaste projet national d'homogénéisation et d'intensification des capteurs, d'un coût de 10 millions d'euros, le maillage a été fortement resserré. On dénombre aujourd'hui près de 180 stations, même dans les régions de faible sismicité, « *qui peuvent détecter n'importe quel séisme dépassant 1,5 de magnitude et non plus 2 comme c'était le cas auparavant* », se réjouit Jérôme Vergne. Ce réseau permet d'identifier peu à peu de nouvelles failles actives, de mieux circonscrire celles qui n'étaient que grossièrement localisées. Il renseigne aussi les chercheurs sur un autre type de phénomène, de nature environnementale, lié aux inondations éclair suscitant notamment des glissements de terrain. Toutes ces données « *dessinent un nouveau visage de la sismicité naturelle* », assure Éric Beucler. Et devraient produire, d'ici à quelques années, une meilleure cartographie de l'aléa sismique dans notre pays. ■ **F. D.**

PRÉDICTION

Les volcans français à surveiller

La Soufrière, en Guadeloupe, est le volcan qui est susceptible de produire « *la prochaine grosse éruption magmatique explosive sur le territoire national dans ce siècle ou le prochain* », estime Claude Jaupart, de l'Institut de physique du globe de Paris. Car ce type de volcan suscite des événements majeurs environ deux fois par millénaire. Or, le dernier remonte au XVe siècle — contrairement à la montagne Pelée par exemple, sur l'île voisine de la Martinique, qui est entrée en éruption en 1902 en tuant alors 28 000 personnes. « *Ces deux volcans sont surveillés en permanence, grâce à une panoplie de capteurs qui donneraient l'alerte plusieurs semaines à l'avance* », assure le géophysicien. Sur le continent, c'est un système de volcans situés dans la région de l'Eifel, dans l'ouest de l'Allemagne, qui serait le plus dangereux. Les éruptions qu'ils ont engendrées il y a 13 000 ans avaient impacté presque tout l'Hexagone, comme d'anciens dépôts de cendres en témoignent. « *Ils pourraient potentiellement se réveiller, même si leur période d'activité est très incertaine faute de données statistiques suffisantes* », indique Claude Jaupart. Le volcanisme d'Auvergne, dont les dernières manifestations datent d'il y a 6000 ans, pourrait connaître aussi de nouvelles éruptions. « *Son origine reste toutefois très mal comprise* », souligne le chercheur. Il est donc difficile de prédire la fréquence ou les conséquences possibles de ses éruptions.

La Soufrière (Guadeloupe) pourrait connaître une éruption explosive majeure au cours de ce siècle ou du prochain.

A. BRUSINI/HEMIS.FR

DÉTECTION

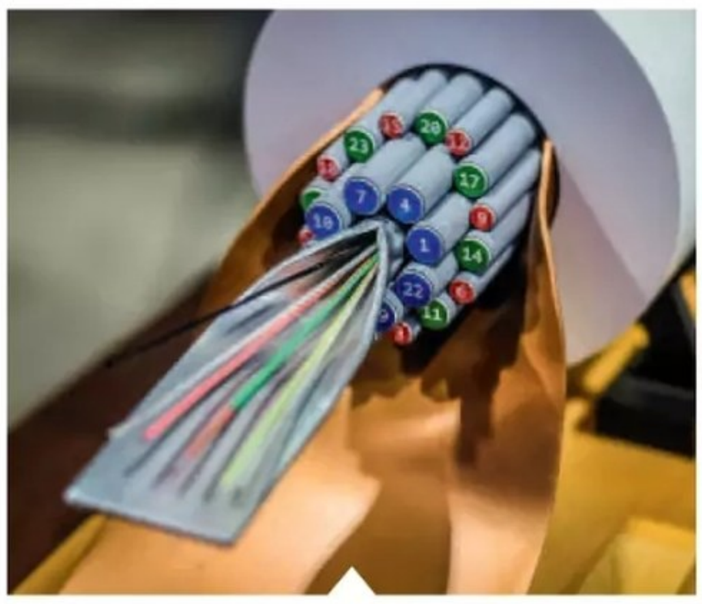
3 innovations pour réduire les risques

Au-delà des méthodes bien connues et éprouvées, la recherche explore de nouvelles pistes pour détecter plus en amont des catastrophes naturelles. Apprentissage automatique et réseaux de télécommunications à l'appui.

La fibre optique contre les séismes

C'est potentiellement un détecteur géant de séismes, couvrant toute la planète ou presque et sans énormes coûts de déploiement puisqu'il est déjà en place! Il s'agit du réseau de câbles de télécommunications en fibres optiques, où les données passent sous forme d'ondes lumineuses. Plus d'un million de kilomètres de fibre optique sont posés au fond des océans. Le principe a émergé au milieu des années 2010, quand des chercheurs en géophysique de l'université Stanford (États-Unis) ont tiré 4,8 km de ce type de câbles sous le campus. Des pulsations laser sont envoyées depuis une extrémité, de manière à observer les perturbations subies par l'onde lumineuse lorsque le sol vibre. Depuis, les projets se multiplient (Suisse, Royaume-Uni, Norvège).

Fin 2019, une équipe française a capté un séisme de magnitude 1,9 survenu à 100 km d'un câble tiré au large de Toulon pour les besoins d'un laboratoire sous-marin. L'idée est maintenant d'exploiter une particularité des réseaux de télécommunications : ils contiennent de la « fibre noire », c'est-à-dire des fibres encore non utilisées. Il est donc possible de les louer aux opérateurs pour faire passer des signaux dédiés à l'activité sismique.



LAURENT GRANDGUILLOT/REA

Les variations de lumière dans la fibre optique permettent de mettre en évidence les vibrations sismiques.

Les ondes radio satellitaires contre les tsunamis

Les tsunamis peuvent se faire sentir jusque dans l'ionosphère, entre 50 et 600 km d'altitude, perturbant le contenu électronique total (TEC). Soit la quantité d'électrons dans une colonne large d'un mètre carré. Or, ces électrons aident à la propagation des ondes radio utilisées par les satellites. Sur cette base, une équipe franco-américaine a entraîné un algorithme sur les perturbations du TEC captées par les satellites de géolocalisation avant et après trois tsunamis en 2010, 2011 et 2012. Puis, l'outil a analysé les données d'un tsunami de 2015. Résultat ? L'événement est identifié à 91,7 %. Les chercheurs estiment pouvoir améliorer la performance en entraînant l'algorithme sur davantage de tsunamis. « *Mais ce n'est pas si simple puisque les conditions ionosphériques sont variables et les caractéristiques d'un séisme diffèrent d'un événement à l'autre* », tempère Michela Ravanelli, de l'Institut de physique du globe. L'approche ne peut être que complémentaire des moyens existants.

Le laser contre les éruptions volcaniques

Pouvoir décrypter en quelques minutes le comportement d'un volcan pour mieux protéger les populations exposées ? C'est possible, selon une équipe australo-espagnole. Leur méthode, publiée en 2023, consiste à analyser l'évolution de la chimie des liquides magmatiques au cours de l'éruption afin de prédire la durée du phénomène et son intensité. Les chercheurs procèdent par ablation laser pour obtenir des particules de matrice magmatique. La précision leur épargne les manipulations physico-chimiques nécessaires jusque-là pour écarter les cristaux de roches présents dans le magma mais datant d'avant l'éruption. La méthode a été validée sur l'éruption de La Palma aux îles Canaries de septembre à décembre 2021 et, selon les scientifiques, elle pourrait s'appliquer à des volcans endormis. ■ **A. D.**

MAURICIO LIMA/THE NEW YORK TIMES-REDUX-REA - NICOLE TUNG/THE NEW YORK TIMES-REDUX-REA

Drone : une arme inédite sur le champ de bataille

L'aéronef commandé à distance transforme les conflits modernes. Le détournement de drones de loisir à des fins de surveillance, de guidage de l'artillerie ou même de bombardement est devenu un élément clé de la guerre en Ukraine.

Au cours de l'année 2002, dans le ciel de l'Afghanistan, ils ont hanté l'atmosphère comme des requins en maraude. Les drones Hale (High altitude long endurance) ou Male (Medium altitude long endurance) y ont été à la fois l'œil de Sauron qui voit tout, et l'épée de Damoclès qui peut frapper à tout instant. Des acteurs nouveaux dans le combat, comme le furent les avions durant la Première Guerre mondiale. Depuis, leur rôle n'a cessé de s'affirmer. Durant presque deux décennies, des machines au nom évocateur de « Predator », ou de « Reaper » (la faucheuse), ont effectué des dizaines de milliers de frappes de missiles. Pourvues d'une liaison satellite, ces machines peuvent être pilotées en temps réel, durant des dizaines d'heures, dans les cieux de l'Afghanistan, de l'Irak ou du Pakistan, tandis que leur poste de pilotage demeure dans une base militaire du Nevada (États-Unis). Elles ont constitué longtemps un for-

◀ **L'analyse des images** prises par des drones, comme ces petits modèles chinois (à gauche, le long de la ligne de front, près de Lyman, en Ukraine, en juin dernier) permet aux militaires ukrainiens (à droite) d'identifier et de surveiller les positions des mouvements de troupes russes.

midable outil pour éliminer de manière ciblée un ennemi n'ayant pas la suprématie aérienne, sans risquer la vie de soldats sur le terrain. Une telle capacité exigeait certes un portefeuille bien rempli : entre 15 et 30 millions de dollars pour un Reaper. Il ne faudra cependant qu'une quinzaine d'années pour que le drone passe du statut d'« arme du plus fort » à outil de base de la plupart des groupes armés. Notamment du fait de l'apparition du drone de loisir.

En effet, au début de la décennie 2010, arrivent sur les rayons d'électronique de loisir les premières caméras volantes très faciles à piloter. « *Sur le plan des performances, comparer ces machines à des drones militaires de type Predator ou Reaper reviendrait à chercher les similitudes entre un 38 tonnes et une charrette à bras* », ironise Léo Péria-Peigné, chercheur au Centre des études de sécurité de l'Institut français des relations internationales (Ifri), sur les thématiques de l'armement. Et pourtant, ces « charrettes à bras » vont bouleverser le champ de bataille. Car, pour répondre à la demande du marché des drones de loisir, la fabrication devient massive. Dès 2013, il est possible de se procurer, pour quelques milliers de dollars, une plateforme volante très sophistiquée. Pilotées par ondes radio, ces machines sont capables de procéder à des opérations de reconnaissance dans un rayon de plus d'un kilomètre, et ainsi d'effectuer des patrouilles ou de coordonner des déplacements de troupes.

Ce que les groupes armés ne tardent pas à expérimenter. « *Depuis 2016, Boko Haram (organisation islamiste originaire du Nigeria) fait précéder systématiquement toutes ses attaques par des reconnaissances de drones* », rappelle Joseph Henrotin, directeur scientifique du Centre d'analyse et de prévision des risques internationaux (Capri). Quant au groupe État islamique, il les emploie pour guider ses véhicules piégés qui se faufilent entre les barrages jusqu'aux bâtiments qu'ils veulent attaquer. Puis il utilise les images pour sa propagande.

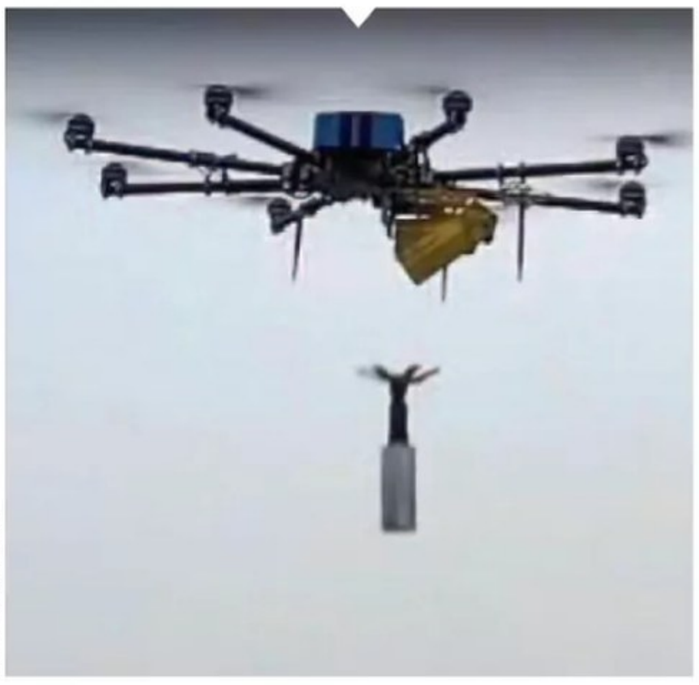
Des quadricoptères lanceurs de munitions

Parallèlement, ces plateformes volantes sont transformées pour être adaptées à de nouveaux usages. Ainsi le Hezbollah (groupe islamiste chiite basé au Liban) a rapidement « *intégré des quadricoptères commerciaux modifiés à mesure qu'il s'engageait dans des opérations plus soutenues contre des ennemis moins perfectionnés en Syrie* », relate une étude comparative de l'usage des drones par des groupes armés non étatiques au Moyen-Orient, conduite en 2023 par le Centre international contre le terrorisme (ICCT). « *En 2016, le groupe État islamique a été le premier à utiliser des drones pour larguer des munitions sur ses ennemis* », poursuit Joseph Henrotin. Et cette transformation du drone en un mini-mortier volant, dont les munitions sont parfois également modifiées (adjonction d'ailettes faites avec des bouteilles en plastique ou des volants de badminton) pour améliorer la préci- ▶

« L'Ukraine a rendu l'usage du drone presque systématique en appui d'actions d'infanterie »

Joseph Henrotin, directeur du Centre d'analyse et de prévision des risques internationaux

Le R18, drone d'attaque développé par l'entreprise ukrainienne Aerorozvidka, peut larguer des grenades sur des cibles ennemies.



AEROROZVIDKA

YULII ZOZULIA/UKRINFORM / ZUMA WIRE/REA

Le Bayraktar TB2, drone bon marché de conception turque, a été utilisé avec succès à de nombreuses reprises par les Ukrainiens contre les forces russes.

sion du largage, se répand. Fin 2016, le PKK, le Parti des travailleurs du Kurdistan, a ainsi largué une grenade sur deux soldats turcs depuis un multicoptère. Ce même type de machine a été utilisé par le Hamas (mouvement islamiste et nationaliste palestinien) pour neutraliser des tourelles de sécurité israéliennes autour de la bande de Gaza, lors de l'attaque terroriste du 7 octobre.

Difficiles à repérer, et encore plus à atteindre, ces machines volantes ont immédiatement constitué une épine dans le pied des armées conventionnelles. En 2017, le général américain Raymond Thomas faisait part de son désappointement face à ces engins qui, en Irak, *« se promenaient juste en dessous de la zone où nous exercions notre supériorité aérienne, et contre lesquels notre seule réponse disponible était de tirer dessus à l'arme légère » (lire l'encadré p. 51).*

Des machines bon marché dotées d'un avantage tactique

Avec l'invasion russe de l'Ukraine en février 2022, la menace des drones a pris encore une autre dimension. *« Les drones n'ont jamais été utilisés aussi massivement qu'actuellement en Ukraine, qui peut en perdre jusqu'à 10 000 par mois,* chiffre Joseph Henrotin. *Et si la Russie en perd moins, c'est essentiellement parce qu'elle en utilise moins. »* Des chiffres confirmés par un rapport du think tank anglais Rusi (Royal united services institute for defence and security studies), qui estime entre 25 et 50 le nombre de drones des deux camps qui peuvent opérer simultanément sur chaque portion de 10 km de la ligne de front. Certes, notamment du fait de contre-mesures électroniques (brouillage du signal, piratage…), les drones tombent comme des mouches. Mais ils sont si bon marché et ils procurent un tel avantage tactique qu'il est malgré tout rentable de les risquer sur le champ de bataille. Car le drone apporte une aide considérable aux équipes d'artilleurs qui ajustent mieux et plus vite leurs tirs, économisant ainsi des munitions. *« L'Ukraine était une "puissance dormante" en matière de drones, car elle possédait une grande quantité de drones soviétiques tels que le Tupolev Tu-141* [un drone avion à réacteur reconverti en missile], *mais aussi une solide industrie aéronautique »*, explique Joseph Henrotin. Ce qui lui a permis de disposer rapidement de matériel efficace. *« De plus, le pays entretenait des liens industriels forts avec la Turquie bien avant l'invasion, notamment sur la production des moteurs des drones Bayraktar. »* Un drone armé très rustique, mais qui s'est montré si efficace contre les troupes russes au début de l'invasion qu'une chanson à sa gloire est devenue virale en Ukraine. Ce pays a réussi à développer

DÉTOURNEMENT

Une arme de subversion efficace

Les exemples se sont multipliés ces dernières années de l'utilisation croissante des drones à des fins politiques. En 2013, le Parti pirate a fait voler une machine à proximité de la chancelière allemande Angela Merkel lors d'un meeting à Dresde, pour protester contre la surveillance policière. En 2015, à Tokyo (Japon), un Phantom du constructeur chinois DJI, transportant du sable radioactif collecté près de la centrale nucléaire de Fukushima, s'est posé sur le toit de la maison du Premier ministre japonais Shinzo Abe. Toujours côté nucléaire : en 2018, Greenpeace survole la centrale électrique du Bugey, près de Lyon, avec un drone équipé d'un costume de Superman et l'écrase volontairement contre le mur d'un bâtiment pour démontrer la vulnérabilité de ces installations.

sa propre industrie de drones, notamment le R18, une machine à huit hélices à même de larguer des charges explosives sur l'ennemi ou de ravitailler ses troupes isolées. « *L'Ukraine a fait très massivement appel au* crowdfunding *et au mécénat et a donné naissance à tout un écosystème proto-industriel, ce qui a eu des conséquences en matière de massification, et rendu l'usage du drone presque systématique en appui d'actions d'infanterie* », décrit Joseph Henrotin. Le pays est ainsi devenu un laboratoire de tests dans lequel des dizaines de systèmes de drones différents passent ou non l'épreuve du feu. Et il est aujourd'hui bien compliqué d'avoir une vue d'ensemble de la part que représente chaque type de machine (surveillance, mortier, drones kamikazes) sur le terrain.

Du modèle en carton à celui imprimé en 3D

Si les drones chinois de DJI sont toujours massivement utilisés, ils côtoient des drones en carton australiens, des modèles imprimés en 3D britanniques, ou des machines aériennes agricoles d'épandage reconditionnées pour larguer des munitions. La Russie n'est pas en reste et exploite aussi, par milliers, des dizaines de systèmes de drones différents. Notamment des machines de reconnaissance Orlan, des munitions rôdeuses (Lancet) et des drones kamikazes de conception iranienne (Shaheds).

Parallèlement, ce conflit a montré l'importance des constellations de satellites capables de fournir rapidement un accès à Internet dans les zones de combat. Outre le fait qu'elles permettent aux armées de maintenir un réseau de communication vital pour coordonner leurs troupes, ces liaisons satellitaires sont également indispensables pour faire rapidement remonter des vues aériennes du théâtre des opérations, aux centres de commandement. Ainsi, au début de l'invasion russe, après que le Premier ministre ukrainien a interpellé le milliardaire Elon Musk sur Twitter, celui-ci a mis à disposition en Ukraine l'infrastructure satellitaire Starlink dont il est propriétaire. Puis, quelques mois plus tard, le milliardaire a décidé d'empêcher une attaque de drones navals ukrainiens contre la flotte russe en mer Noire en coupant localement la liaison satellitaire nécessaire à l'opération.

Cette massification des drones sur le champ de bataille a conduit à d'importantes modifications tactiques, notamment parce que leur omniprésence permet de surveiller en temps réel de bien plus grandes surfaces à moindre coût. « *Il n'y a par exemple plus besoin d'une ligne de tranchée continue tout le long du front,* explique Léo Péria-Peigné, *les armées peuvent se contenter de points forts dont les intervalles sont surveillés par des drones et sur lesquels l'artillerie peut rapidement faire feu en cas d'incursion.* » Le moindre déplacement étant presque immédiatement repéré, les blindés comme l'artillerie doivent plus que jamais jouer à cache-cache pour espérer survivre.

Le drone s'est désormais imposé comme un outil indispensable quel que soit le champ de bataille. Et il reste sans doute encore beaucoup à découvrir quant à ses usages futurs, et à la manière de l'intégrer dans les armées. « *Comme toute arme, le drone ne s'utilise pas seul : il est "en appui de" et "appuyé par". Et comme toute arme, son utilisation ne compense pas un plan mal conçu ou une opération mal planifiée* », conclut Joseph Henrotin. ■ **Erwan Lecomte**

STRATÉGIE

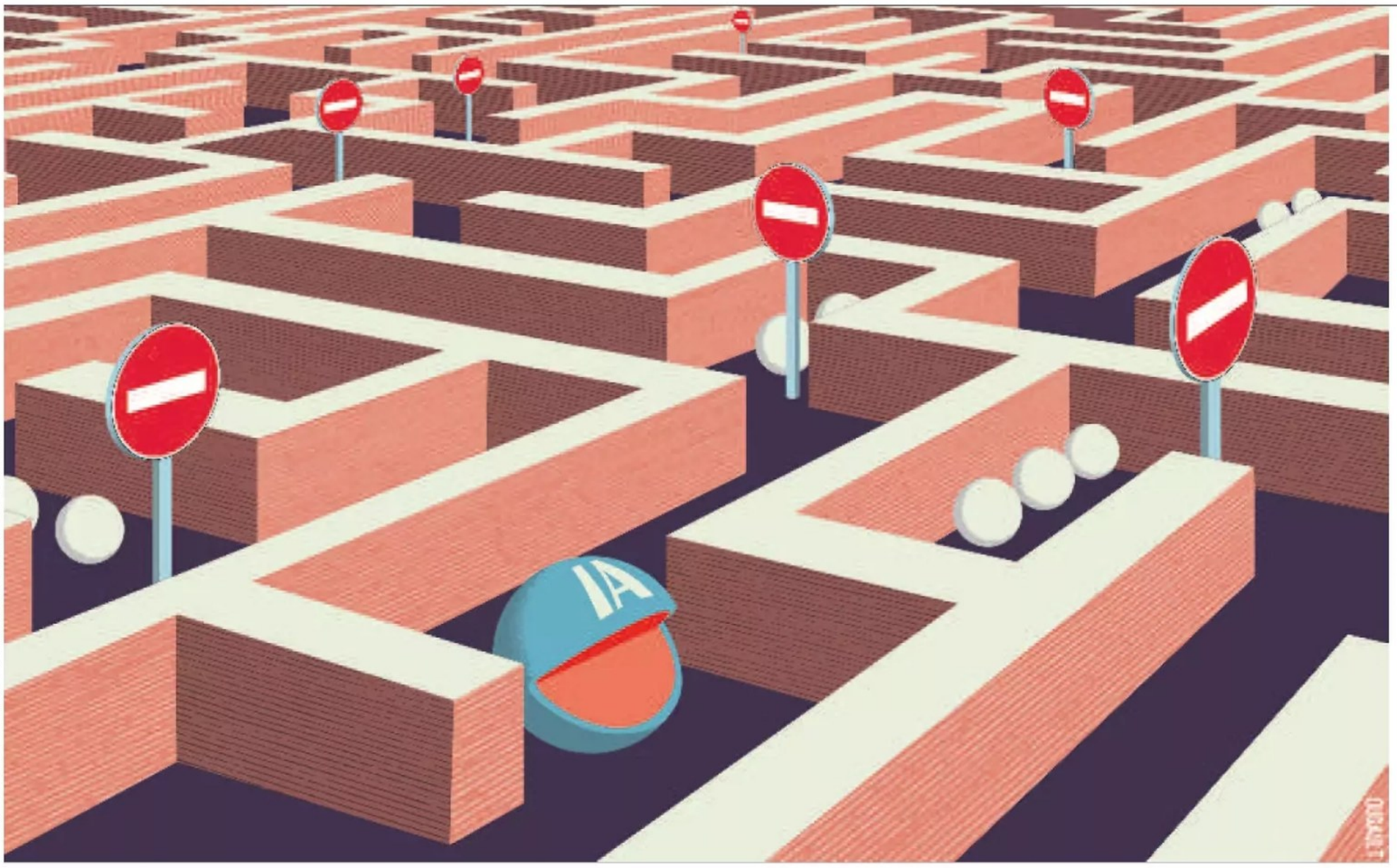
Abattre les drones, à quel coût ?

PATRICK LE VEQUE/SIPA

Le Mamba, système de défense sol-air français, peut repérer un drone et le détruire avec un missile.

Les armées disposent de nombreux moyens pour abattre les drones. « *Nous avons, en France, des systèmes sol-air très efficaces, tels que les Mamba, qui peuvent repérer les drones au radar, et les détruire à l'aide d'un missile,* explique Léo Péria-Peigné, chercheur à l'Ifri. *Sauf que, si cela fait sens de tirer une munition aussi coûteuse contre un avion de combat ennemi, cela en a beaucoup moins contre un drone à quelques milliers de dollars, voire moins.* » Et le ratio est encore plus mauvais lorsque la menace prend la forme d'un petit quadricoptère d'une centaine de dollars. « *On a pensé pendant des années que le missile suffirait à nous prémunir des menaces aériennes, mais on redécouvre aujourd'hui que le canon rapide de courte portée, capable de mitrailler des munitions bien meilleur marché avec une grande précision, permettait de compenser ce déséquilibre* », poursuit-il.

Ainsi, les Gepard, des véhicules d'interception aérienne à courte portée données par l'armée allemande aux Ukrainiens, jugés obsolètes au début des années 2000, ont trouvé une nouvelle utilisation dans le cadre du conflit russo-ukrainien en tant qu'arme anti-drone.



ANTOINE MORE AU DUSAULT POUR SCIENCES ET AVENIR - LA RECHERCHE

La ruée sur les données ne fait que commencer

L'apprentissage automatique qui a mené aux chatbots Bard ou ChatGPT a nécessité l'usage de gigantesques volumes de données puisées en vrac sur le Web. La pratique commence à poser des problèmes à la fois techniques et légaux.

« Scanner » le Web. La pratique n'est pas nouvelle, elle consiste à explorer le Web avec un logiciel (un « Web crawler ») à des fins d'indexation, comme le font les moteurs de recherche, ou d'archivage. Les éditeurs de sites Internet ne s'en formalisaient pas plus que cela, mais à l'automne 2022, l'apparition de ChatGPT a agi comme un électrochoc. L'agent conversationnel d'OpenAI fonctionne grâce à une famille de modèles de langage (GPT) entraînée sur de gigantesques volumes de contenus récupérés en ligne. Forums, blogs, articles, pages Wikipédia, sites de médias, bases publiques de codes informatiques, le « Web crawler » d'OpenAI GPTBot prend tout ce qu'il trouve. Google pour son modèle LaMDA (moteur du chatbot Bard) ou Meta pour LLaMA font la même chose. Autrement dit, le « scan » du Web a conduit à la production d'une technologie capable de créer elle-même du contenu. Sans oublier que ChatGPT existe en version payante et est intégré dans le moteur Bing de Microsoft. Tout cela en se servant des données des autres sans avoir demandé, et encore moins payé. Même chose pour les intelligences artificielles (IA) qui génèrent des images à partir de descriptions en langage naturel (Dall-E 2, Midjourney).

Et ce n'est qu'un début, souligne Olivier Martinez, fondateur de 255hex.ai et consultant en intégration d'IA génératives

1560

milliards de mots issus de conversations publiques et de textes sur le Web constituent le corpus d'entraînement du modèle de Google LaMDA.

PABLO VILLALOBOS

> « On ne peut pas réutiliser encore et encore les mêmes données d'entraînement car cela dégrade les performances de l'algorithme »
>
> **Pablo Villalobos,** chercheur expert en IA chez Epoch

en entreprise : « *Pendant des années, on a fait des entraînements séparés pour le texte, l'image, le son. Or, les modèles deviennent multimodaux* [production simultanée de données de natures différentes], *donc l'entraînement devient aussi multimodal. C'est la suite logique.* »

Des médias bloquent le robot « crawler » d'OpenAI

Depuis avril, les plateformes de forums Reddit et Stack Overflow font payer l'accès à leurs données à travers leur interface de programmation. Puis des médias (CNN, *The New York Times*, Reuters, Radio France, TF1info.fr, *Mediapart, Libération, Le Figaro*…) se sont mis à bloquer le robot « crawler » d'OpenAI sur leurs sites. Ce blocage consiste à insérer une instruction dans un fichier appelé robot.txt, qui indique à tout type de robot venant sur le site ce qu'il a le droit ou non de faire. OpenAI et Google ont eux-mêmes indiqué comment bloquer ainsi leurs bots respectifs. Mais, techniquement, rien n'empêche de passer outre. De plus, la méthode concerne des bots nommément cités, dans le cas présent GPTBot et ChatGPT-user pour OpenAI et Google Extended et VertexAI chez Google. « *Rien ne dit qu'OpenAI n'en a pas d'autres ou ne passe pas par des prestataires* », note encore Olivier Martinez. La méthode est surtout un signal envoyé par les éditeurs qu'ils veulent négocier un cadre légal pour l'usage de leurs données, contrepartie financière à la clef.

Mais ces péripéties relèvent d'un enjeu plus global. « *Les performances d'un modèle d'apprentissage automatique sont liées, entre autres choses, à la quantité de données vues lors de son entraînement, mais on ne peut pas réutiliser encore et encore les mêmes données car cela dégrade ces performances. Donc pour les améliorer, l'une des quelques solutions connues consiste à l'entraîner sur de nouvelles données* », explique Pablo Villalobos, expert du groupe de recherche en intelligence artificielle Epoch, coauteur d'un article prévoyant une pénurie de données dites de qualité pour les modèles de langage d'ici à 2026.

POUR EN SAVOIR PLUS

La liste régulièrement actualisée des sites de médias français qui bloquent les robots « crawlers » : sciav.fr/923crawler

Une information de qualité difficile à obtenir

Cette catégorie des données de qualité désigne des contenus ayant passé certains filtres : textes professionnels, articles sourcés ou revus par les pairs, littérature scientifique… Maintenant que les technologies savent parfaitement imiter le langage naturel, ces données deviennent cruciales pour que Bard ou ChatGPT livrent des réponses factuellement exactes. Or, leur accès ne va pas de soi. « *GitHub est la plus vaste plateforme publique de codes informatiques et les modèles actuels l'utilisent déjà,* cite en exemple Pablo Villalobos, *donc pour en avoir plus, il faudrait se tourner vers des données privées ou d'origine obscure, comme des bases internes d'entreprises privées.* » Après le défi technique, la bataille pour les données d'entraînement est en train de se muer en bataille légale. ■ **Arnaud Devillard**

LE MOT DU MOIS

Entraînement

Les algorithmes d'apprentissage automatique peuvent fournir un résultat (reconnaître un visage, un son, traduire, générer du texte, prendre une décision) parce qu'ils ont été exposés au préalable à des données dont ils ont tiré des régularités statistiques. Ce sont les données d'entraînement, un corpus cohérent en lien avec la tâche que l'algorithme doit réaliser (par exemple, des CV de candidats embauchés pour un algorithme de recrutement). Une deuxième phase, la validation, utilise des données du même type mais qui n'ont pas été vues lors de l'entraînement. Elle sert à voir comment l'algorithme se comporte et à mieux le régler. Souvent, les données d'apprentissage et de validation sont issues d'un même corpus divisé en deux. La phase de test évalue les performances de l'algorithme finalisé sur des données entièrement nouvelles (validation et test se confondent parfois).

FRÉDÉRIC LANCELOT / DIVERGENCE

Fileyeurs, caseyeurs, barges aquacoles, ligneurs, thoniers, senneurs, palangriers, chalutiers (comme ci-dessus le « Louis Gaetane II » à Sète, dans l'Hérault)..., l'extrême diversité des bateaux en France rend épineuse la mise en place d'une politique de décarbonation.

Pêche

L'urgence d'adopter des pratiques durables

Les pouvoirs publics affichent leur volonté de sortir le secteur de la pêche de sa dépendance aux énergies fossiles. Mais la grande hétérogénéité des 5000 bateaux de l'Hexagone rend impossible la généralisation de moteurs plus verts. Au-delà des initiatives individuelles, certains évoquent même le retour en force des bateaux à voiles ! Décryptage.

Par Loïc Chauveau

L'hiver 2023 pourrait bien marquer l'« entrée en cure de désintoxication » des énergies fossiles du secteur de la pêche. L'aide fiscale de 20 centimes par litre de gazole est en effet en sursis. Cette subvention (ainsi que celles accordées aux engins de travaux publics et au secteur routier) est néfaste à la lutte contre le changement climatique parce qu'elle facilite la consommation d'une énergie fossile, mais vitale pour les pêcheurs dont l'activité n'est pas rentable sans elle. Les prix du gazole marin ont ainsi plus que doublé en 2022, accaparant 35 % des revenus du secteur, contre 13 % en 2020. Ces aides doivent pourtant disparaître au nom de la neutralité carbone, « *avant 2030* », assure même le commissaire européen Virginijus Sinkevicius. Le secteur maritime en son entier pèse 3 % des émissions nationales des gaz à effet de serre. Les marins entrent dans un débat « houleux » : par quoi remplacer le pétrole?

« *Les voies des biocarburants, des carburants de synthèse, de la combustion hybride hydrogène-gazole, de l'hydrogène pur, de la propulsion par voile vont être explorées conjointement* », prévient-on à la Direction générale des affaires maritimes, de la pêche et de l'aquaculture (DGAMPA) qui a publié en janvier 2023 sa feuille de route de décarbonation de la filière maritime . À ce jour, dans le secteur de la pêche, les réalisations sont extrêmement peu nombreuses ; les idées et les projets techniques sont encore sur les tables ▸

à dessin des ingénieurs. D'autant que le secteur est complexe. Les 5000 bateaux basés dans 65 ports de l'Hexagone sont extrêmement différents suivant les techniques employées. Fileyeurs, caseyeurs, chalutiers, barges aquacoles, ligneurs, thoniers, senneurs, palangriers sont de longueurs différentes selon que les sorties sont quotidiennes et côtières ou hebdomadaires et hauturières. De plus, il n'y a pas de série industrielle, si bien que chaque unité est son propre prototype. Enfin, les métiers sont multiples : armateurs, chantiers, équipementiers, bureaux d'architecture et d'ingénierie navale, port, fluvial, énergéticiens, services financiers, assurance… Le secteur compte une vingtaine de fédérations professionnelles!

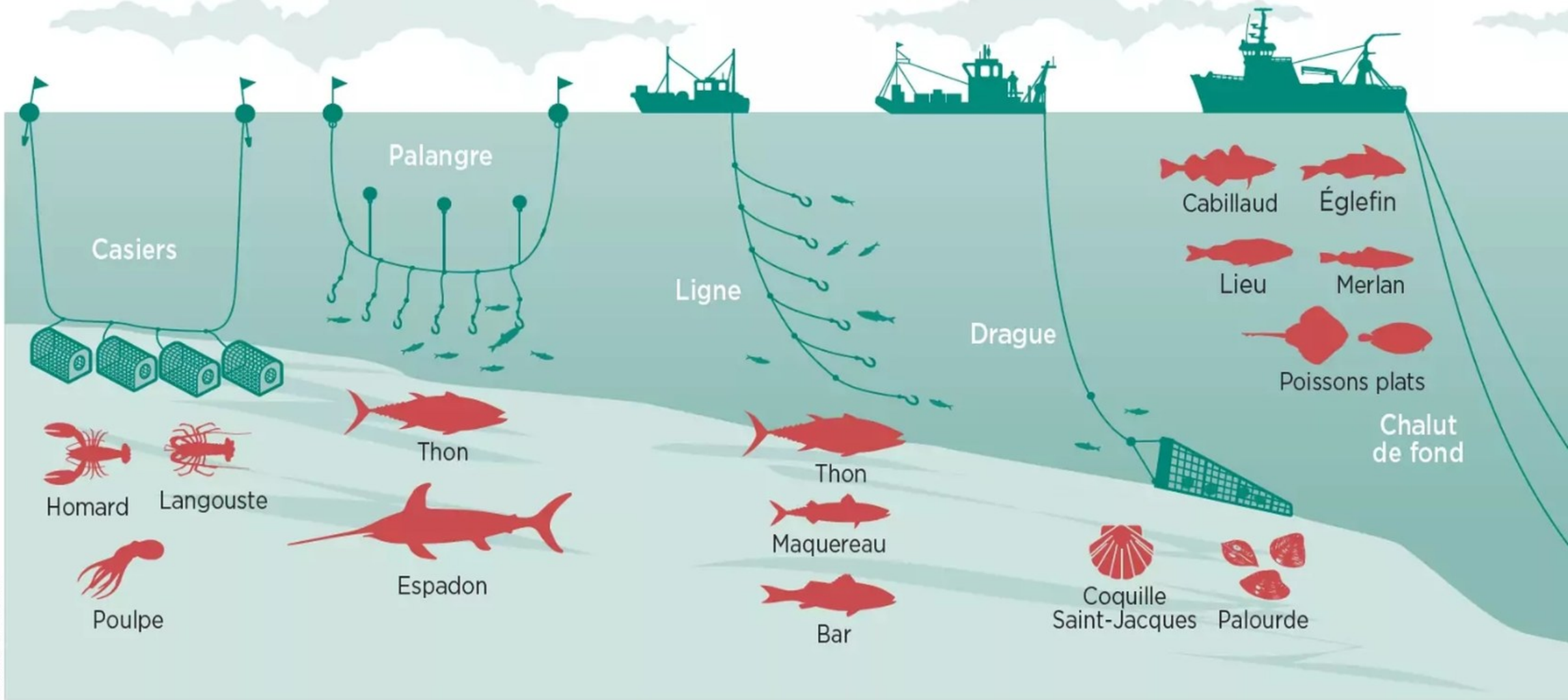
GWEN RASTOLL/LE TÉLÉGRAMME/MAXPPP

Une voile semi-rigide en polymère conçue par Add-Modules, déjà utilisée pour les régates, est ici testée sur l'« Oceania », un bateau de pêche basé à Quiberon (Morbihan).

De l'hydrogène à la voile, de multiples initiatives individuelles

Ce que l'on voit émerger aujourd'hui, ce sont des initiatives individuelles. Ainsi, Saint-Brieuc (Côtes-d'Armor) mise sur l'hydrogène. *« Nous avons un projet d'usine produisant 800 kg par jour d'hydrogène à partir d'énergies renouvelables pour alimenter les bus urbains, les bennes à ordure, des industriels,* détaille Francis Gasnier, animateur du cluster hydrogène de la chambre de commerce et d'industrie (CCI) des Côtes-d'Armor. *Et nous avons aussi pensé aux barges d'aquaculture.* » En Bretagne Nord, une soixantaine de navires plats de 15 mètres de long cultivent la moule entre Brest et Saint-Brieuc. En janvier 2023, six de ces bateaux ont été équipés de capteurs pour mieux connaître leur comportement en mer et relever les postes énergétiques. Les architectes navals ont planché sur l'insertion des piles à combustible et des bombonnes d'hydrogène. Résultat : un aménagement de la coque qui autorise l'installation d'une pile à combustible de 70 kilowatts (kW), de six batteries d'une capacité totale de 44 kilowattheures (kWh) afin de prolonger l'autonomie du système, et quatre réservoirs d'une contenance totale de 8,4 kg de dihydrogène (H_2). Le

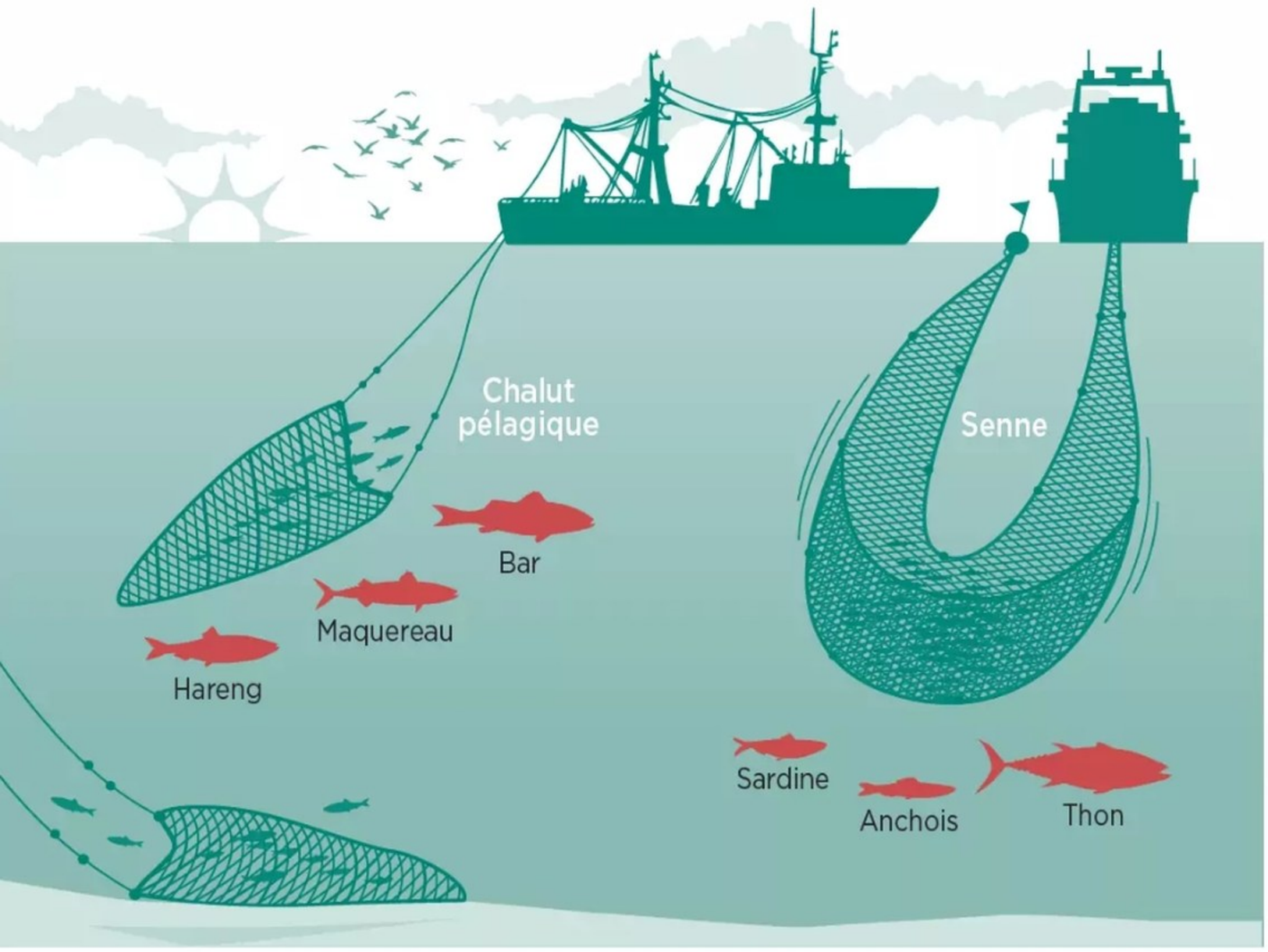
La grande diversité des techniques de pêche



BRUNO BOURGEOIS

tout avec un surpoids d'une tonne qui reste raisonnable pour ne pas gêner l'activité des professionnels. Six mytiliculteurs vont désormais tester la nouvelle propulsion. L'équipement des 60 barges en exercice ferait économiser un million de litres de gazole pour 2600 tonnes de CO_2 évitées.

Et pourquoi pas sonder l'univers des coquilliers, ces petits bateaux qui utilisent la drague pour la coquille Saint-Jacques? Un nouveau programme briochin est en cours de montage, ce qui ravit Olivier Ticos, dirigeant du bureau d'études et d'ingénierie Alca Torda Applications. L'ingénieur travaille depuis les années 1990 sur l'introduction de l'hydrogène dans le monde de la pêche. « *En 2002, nous avons équipé un fileyeur-caseyeur de 12 mètres et fait la preuve que le système de pile à combustible était tout à fait adapté à ce type de pêche aux "arts dormants"* [casiers et nasses], *et ce en toute sécurité* », rappelle Olivier Ticos qui regrette aujourd'hui que cette expérience n'a à l'époque intéressé personne. La voile, elle aussi, est envisagée. Ce ne serait après tout que son retour : les derniers bateaux de pêche à voile ont en effet été mis à la casse dans les années 1950. Ainsi, depuis 2020, la société ADD Technologies teste une voile rigide sur un palangrier de la baie de Quiberon (Morbihan). Cette voile anti-roulis très épaisse — qui reste rigide même en l'absence de vent — est située à l'arrière du bateau pour en assurer l'assise, le rendre moins sensible au roulis et plus facile à manœuvrer quand il s'agit de surveiller la dérive du bateau au moment de la mise à l'eau de la palangre. Dans un deuxième temps, une autre voile sera destinée à la propulsion du navire et donc à la réduction de sa consommation. Autre bureau d'études, bound4blue expérimente une voile rigide de 12 mètres de haut sur un palangrier galicien en Espagne de 37 mètres de long. bound4blue promet jusqu'à 40 % d'économie d'énergie.



RÉGLEMENTATION

Suspendre la pêche pour sauver les dauphins

Du 22 janvier au 22 février 2024, pour la première fois, la pêche sera interdite en golfe de Gascogne pour les bateaux de plus de 8 mètres. La cause : la mortalité élevée de dauphins pris dans les filets. Durant l'hiver 2023, 1380 cétacés ont été retrouvés échoués entre la Bretagne et le Pays basque. Les bateaux équipés de répulsifs acoustiques pourront continuer à pêcher. Selon un programme de recherche de La Rochelle Université, du CNRS et de l'Ifremer, ce voisinage mortel entre chalutiers et cétacés pourrait être dû à des concentrations inhabituelles de sprats et de sardines l'hiver dans les zones côtières. Ces observations suggèrent que les dauphins communs vivant dans le golfe seraient amenés à plonger très près du fond pour se nourrir, là où passent les chaluts.

Des défis techniques pour les chalutiers et les petits bateaux

Plus surprenant encore, Skravik est un catamaran adapté aux petites pêches côtières par casiers, lignes et filets dormants. L'essentiel de l'expérimentation porte sur la cohérence à trouver entre le maniement des engins de pêche et les manœuvres des voiles et gréements. « *C'est ce qui explique pourquoi c'est plus difficile pour les petits bateaux,* explique Lise Detrimont, directrice générale de l'association française Wind Ship, créée en 2019. *Il faut que l'action de pêche et la conduite du bateau se fassent conjointement sans compliquer le travail des hommes et la vie à bord. Sans compter que réglementairement, le navire doit garder ce qu'on appelle une réserve de stabilité, c'est-à-dire qu'en cas de forte gîte, il doit pouvoir se redresser seul.* »

Les partisans du retour de la voile en sont persuadés : les défis techniques seront résolus à brève échéance. La décarbonation du secteur ne devrait donc pas se faire sans le vent, énergie renouvelable et inépuisable.

Ce sera bien plus compliqué pour les chalutiers. Ce type de pêche demande

beaucoup d'énergie tant pour rejoindre les zones maritimes éloignées que pour tracter le chalut. Les biocarburants de deuxième génération sont destinés en priorité au transport aérien et routier et donc *a priori* exclus pour la pêche. De leur côté, l'hydrogène et l'électricité paraissent à ce jour inadaptés aux petits bateaux à l'espace restreint. En France, on compte une seule expérience de piles à combustible embarquées « *mais évidemment pas pour aller sur la zone de pêche et tracter le chalut* », pondère Jean-François Ansquer, secrétaire de l'Interprofession du port de Concarneau (Finistère) et cheville ouvrière du projet baptisé Pilothy (« Pilou Loskant treuzkem hydrogen », pile à combustible et transition hydrogène en breton). Sur l'*Anita Conti*, un chalutier de 17 mètres, l'hydrogène sert plus modestement à alimenter les apparaux de pêche (pilotage du chalut notamment) et des instruments de navigation et d'éclairage du navire. Pour ces seuls usages, les architectes navals ont casé deux piles à combustible de 40 kW, et neuf bouteilles pour stocker 10 kg d'hydrogène à 350 bars de pression. 67 kWh de batteries ont également été ajoutées pour stocker l'énergie récupérée lors du pilotage et du freinage des lourds panneaux qui stabilisent le chalut lors de sa descente sur le fond marin, tout comme l'énergie est récupérée lorsqu'une voiture électrique freine. Il a fallu découper et déposer l'étrave pour la remplacer par un « bulbe » avant permettant de placer les bouteilles d'hydrogène. « *Le bateau a ainsi été alourdi de 20 tonnes et sa jauge (volume) a augmenté de 15 %* », reconnaît Jean-François Ansquer. Les 90 kg d'hydrogène utilisés pendant la saison de pêche ont bien permis d'éviter la combustion de 500 litres de gazole, épargnant ainsi 75 tonnes de CO_2.

1% POUR LA PLANÈTE

« On peut imaginer qu'on ne verra plus de chalutiers vers 2040 ou 2050 »

Thibault Josse, coordinateur de l'association Pleine Mer

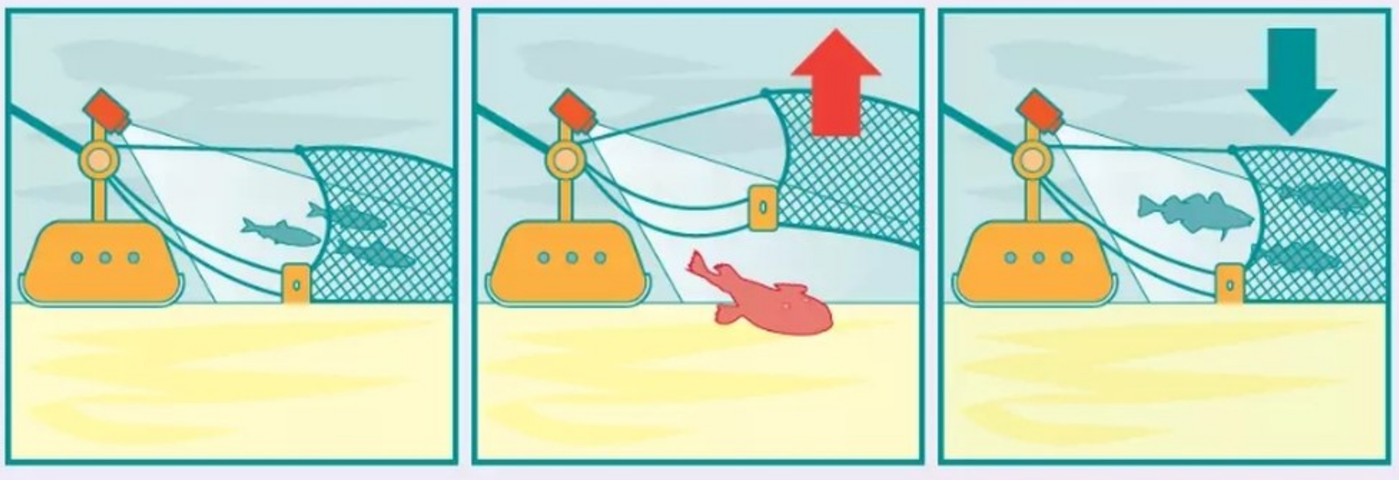
Sortir du gazole, un impact global sur la filière

De façon plus radicale, certains pêcheurs prédisent que le chalutage vit ses dernières années. « *Il affecte trop les fonds marins et il est dépendant des énergies fossiles, si bien qu'on peut imaginer qu'on ne verra plus ces bateaux vers 2040 ou 2050* », assure Thibault Josse, coordinateur de l'association Pleine Mer qui plaide pour explorer des méthodes durables de pêche. Reste que le chalut et la drague représentent aujourd'hui 36 % des volumes débarqués et 47 % de la valeur totale des prises. Sortir du gazole affectera donc la pêche bien au-delà du seul mode de propulsion des bateaux. ■

ÉCOSYSTÈMES

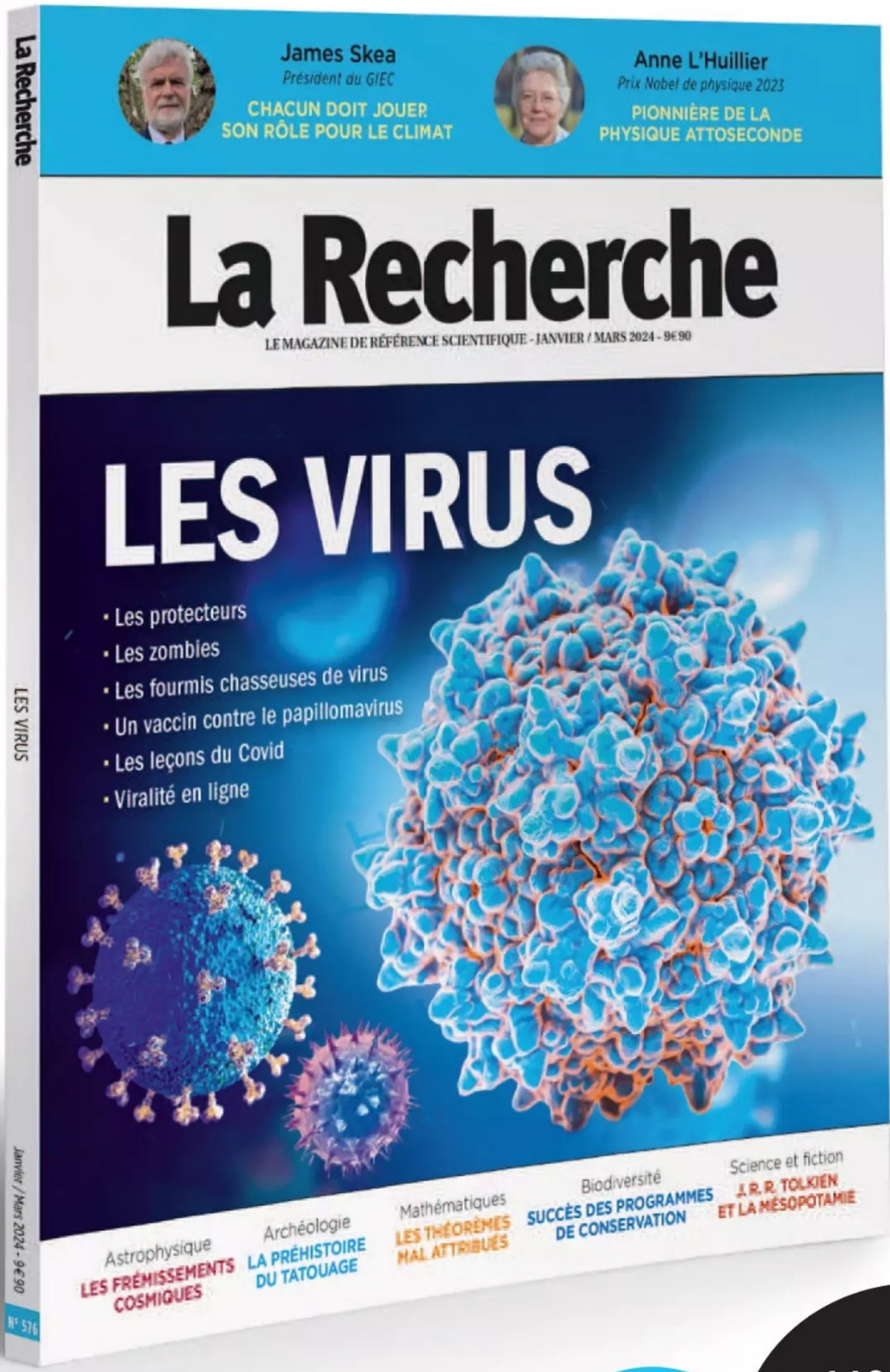
La durabilité passe aussi par la protection des fonds

Peut-on rendre le chalutage moins destructeur des fonds marins? « *Toute la difficulté est de trouver le bon compromis entre une activité de pêche viable et des écosystèmes en bonne santé* », abonde Pascal Laffargue, chercheur en écologie marine à l'Ifremer. Minimiser leur impact est un enjeu majeur de conciliation entre économie et écologie. Pour cela, deux voies sont explorées: l'une cherche à définir les destructions des chaluts sur les écosystèmes en caractérisant les zones fréquentées par les bateaux et l'impact sur des espèces non recherchées par les pêcheurs. L'Office français de la biodiversité procède ainsi actuellement à une analyse des zones atlantiques et méditerranéennes où la pêche abîme les milieux comme les herbiers de zostères et de posidonies, des frayères ou les habitats des coraux. L'autre voie tente d'imaginer des engins de pêche moins destructeurs. Ainsi le projet d'Ifremer Game of Thrawls explore la voie d'un chalut nourri d'intelligence artificielle. Des caméras fixées à l'ouverture filment les poissons tandis qu'en cabine, un logiciel reconnaît les espèces et décide de soulever le filet pour ne pas capturer les prises non désirées. Slogan du projet: « *Trier sur le fond plutôt que sur le pont* ».


BRUNO BOURGEOIS

Le chalut « intelligent » de Game of Trawls repose sur un système d'imagerie (module rouge) commandant la levée du filet pour épargner les espèces non ciblées.

29 SCIENTIFIQUES PARTICIPENT À CE NUMÉRO



La Recherche

LE MAGAZINE DE RÉFÉRENCE SCIENTIFIQUE

Chez votre marchand de journaux

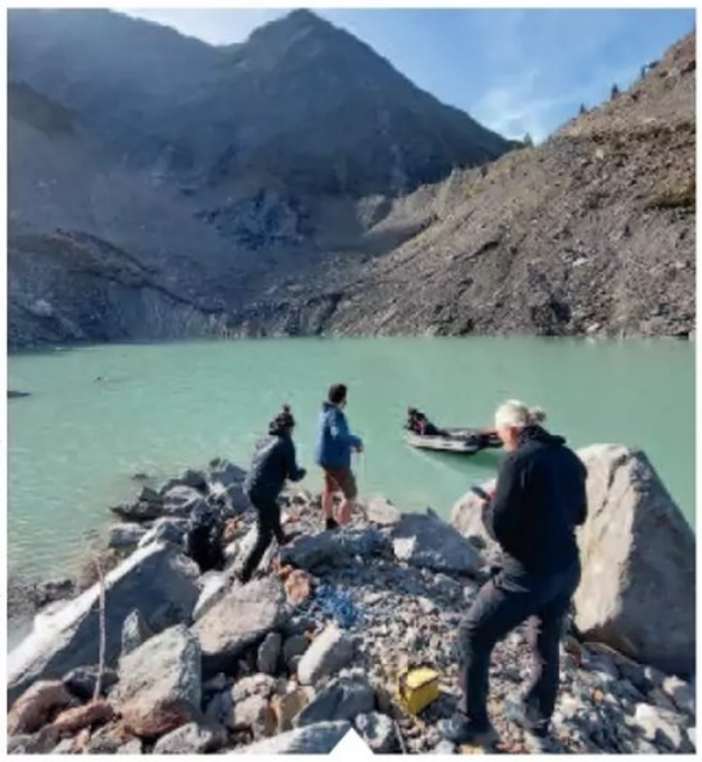
148 pages
MAGAZINE-LIVRE
Trimestriel

L'étonnant retour à la vie après la fonte des glaciers

Lorsque les glaciers reculent, ils libèrent des espaces qui étaient vierges de toute vie. Mais des organismes repeuplent rapidement ces espaces minéraux, constatent les chercheurs venus observer ces environnements.

Le constat est implacable. Les glaciers, immenses étendues blanches encore saisies par les débuts de la photographie, disparaissent. Dans le monde, 210 000 glaciers couvrant 665 000 km² sont affectés par le changement climatique — les données manquent encore pour quantifier le phénomène au Groenland et en Antarctique. Mais, conséquence surprenante, dès que le glacier se retire, la végétation retrouve rapidement ses droits. Ainsi, les espaces libres de glace depuis un siècle sont aujourd'hui couverts par des forêts d'épicéas.

Dans la revue *Nature*, le glaciologue français Jean-Baptiste Bosson, chercheur au conservatoire d'espaces naturels de Haute-Savoie (Asters), a calculé que, d'ici à la fin du siècle, 149 000 km² (soit la superficie du Népal) seraient ainsi libérés des glaces dans le cas d'un scénario d'augmentation des températures de 2 °C, et de 339 000 km² (la superficie de la Finlande) si la tendance actuelle de croissance d'émissions de gaz à effet de serre est maintenue. Depuis 1850, les glaciers du massif alpin ont, de leur côté, perdu 60 % de leur surface : « *Ce n'est pas neutre,* affirme-t-il. *Entre 1850 et 2022, la surface des glaciers alpins est passée de 620 km² à 210 km², soit 410 km² de désenglacement, ce qui représente 15 lacs d'Annecy ou encore quatre fois la surface de Paris.* » Bien qu'elles soient situées en haute altitude, la végétation colonise rapidement ces zones. Voilà l'enseignement du programme Ice&Life consacré à l'évolution des espaces libérés par le retrait des glaciers dans le massif alpin, dont le WWF France et Asters viennent de présenter les résultats. « *Si on laisse faire la nature sur ces zones partout dans le monde, la séquestration de carbone par cette végétation représentera l'équivalent de 10 000 km² de forêts tropicales* », assure Jean-Baptiste Bosson, qui est à l'origine du programme.



RÉMI BRANCATO/RADIO FRANCE/MAXPPP

Les chercheurs du programme Ice&Life étudient l'écosystème du lac de Bionnassay (Haute-Savoie) né de la fonte des glaciers.

La succession des espèces colonisatrices vue en temps réel

Le conservatoire d'espaces naturels appelle donc à une protection stricte de toutes ces régions qui perdent leurs glaciers. C'est le cas pour le Mont-Blanc depuis 2020, avec la publication de l'arrêté de protection des habitats naturels de ce massif. Et cela devrait l'être dans les prochaines années pour l'ensemble des glaciers français, selon la stratégie nationale de biodiversité révélée le 27 novembre dernier. Mais actuel-

MORITZ WOLF / IMAGEBROKER / BIOSPHOTO

La fonte accélérée de la Mer de glace (Haute-Savoie), l'un des plus grands glaciers d'Europe, laisse sur le tracé et sur les pentes de celle-ci des espaces rocheux que la vie colonise à nouveau.

lement, dans le monde, moins de la moitié des glaciers sont situés au sein d'aires protégées.

Avec le programme Ice&life, les écologues ont pris le chemin des moraines. Premier constat : en se retirant, la glace libère ces substrats rocheux et éboulis *a priori* peu favorables à l'émergence de la vie. « *Pourtant, les dynamiques de constitution d'écosystèmes complexes sont relativement rapides* », s'étonne Jérôme Poulenard, spécialiste des sols et socio-écosystèmes de montagne à l'université Savoie Mont-Blanc. Le grand intérêt de ce terrain d'étude, c'est de suivre en temps réel la succession des espèces colonisatrices, des premières bactéries aux plantes pionnières, en passant par la cohorte des champignons, collamboles, insectes volants. Tout en prenant en compte le fait qu'il est difficile d'évaluer le laps de temps entre le moment où la présence d'une espèce est constatée et celui où elle est réellement arrivée. « *La vie ne part pas de rien,* explique Jérôme Poulenard. *Sur la surface des glaciers, des accumulations de poussières permettent une activité bactérienne qui sert de point de départ à la colonisation.* »

Cela se produit en particulier dans les lacs qui se forment dans les cavités creusées par le glacier. « *Le premier organisme à coloniser ces étendues d'eau nouvelles est l'algue* Chloromonas. *Elle ne vient pas de bien loin puisque c'est elle qui colore de rouge les glaciers l'été,* expose Florent Arthaud, spécialiste des lacs d'altitude à l'université Savoie Mont-Blanc. *Le passage de la glace à l'eau liquide n'affecte pas l'algue même si l'eau est saturée de matières en suspension donnant au lac un aspect laiteux qui rend difficile la pénétration de la lumière, et donc la photosynthèse.* »

Des micro-organismes unicellulaires comme les cryptophytes et les chrysophycées apparaissent ensuite, ce phytoplancton attirant le zooplancton comme les rotifères pour une ébauche de chaîne alimentaire.

« *Sur la suite de la colonisation, il faut bien dire qu'on manque de connaissances* », avoue Florent Arthaud. Comment arrivent les insectes volants ? Le vent paraît être l'acteur le plus évident, mais le passage des oiseaux migrateurs, le déplacement des animaux et même les chaussures des randonneurs paraissent être des véhicules potentiels pour les graines, les œufs, les individus matures. L'évolution de ces milieux est ainsi un sujet d'étude majeur.

Ces colonisations sont apparues très souvent dans l'histoire de la Terre, au ▶

CLAUDIA DEFRASNE

« Sur ces surfaces, des accumulations de poussières permettent une activité bactérienne »

Jérôme Poulenard, spécialiste des sols et socio-écosystèmes de montagne à l'université Savoie Mont-Blanc

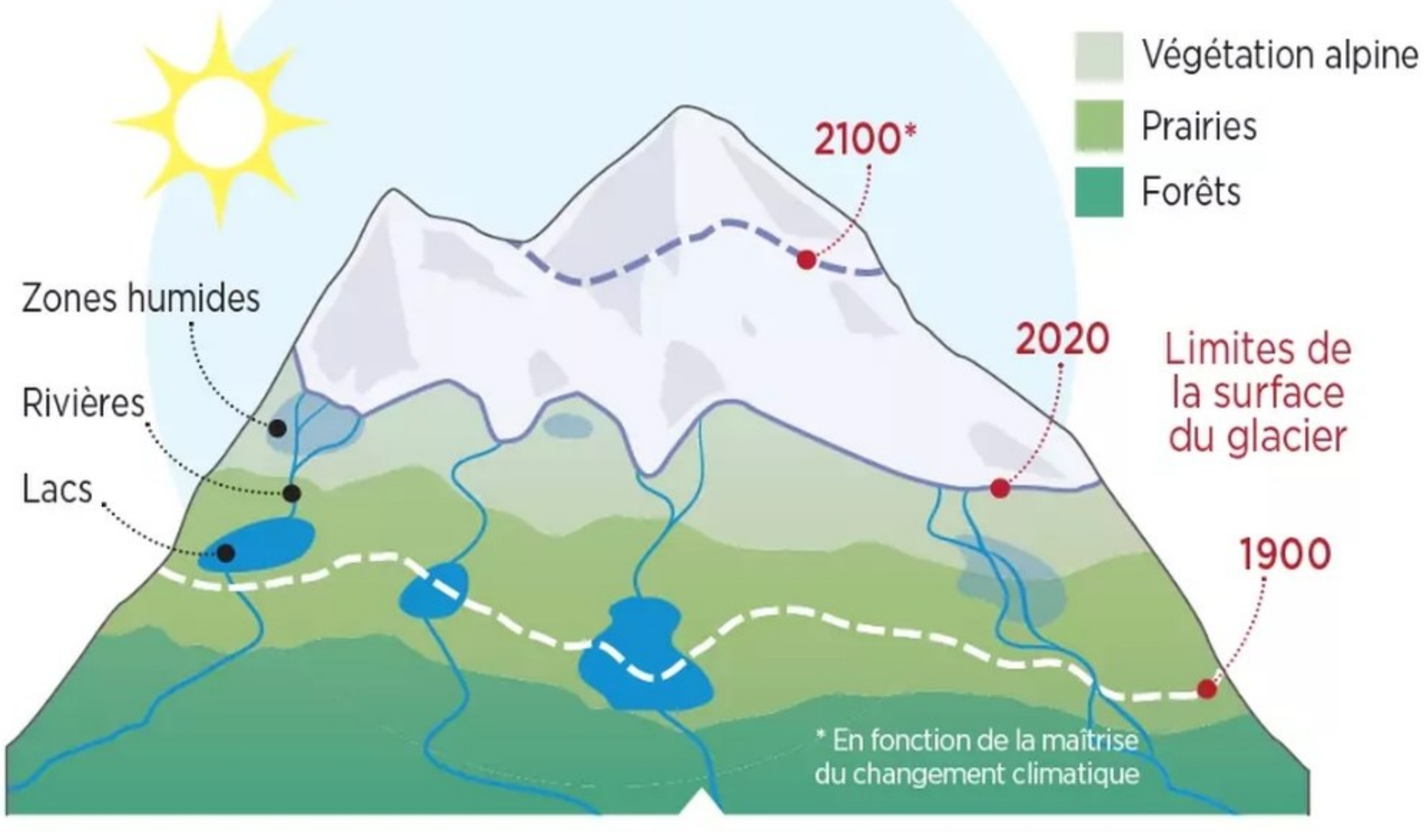
ÉTUDE

La « zone critique », nouvel objet de science

Comment l'eau interagit avec le substrat rocheux? Quels rôles les micro-organismes jouent-ils dans la dissolution des composés carbonatés du sol? Comment se combinent les flux d'eau, d'air, de carbone dans les premiers mètres du sol? Ces interrogations sont regroupées sous le terme d'étude de la « zone critique ». La notion vient des États-Unis. Le plus ancien site de recherche est celui de la rivière Susquehanna, dans les montagnes Appalaches en Pennsylvanie. Sur ce bassin-versant de 120 km², les scientifiques étudient les circuits de l'eau au sein des schistes et les effets sur les organismes vivants. En France, l'observatoire H+, labellisé par le CNRS, mesure et modélise les flux d'eau dans les premières couches géologiques et tente de répondre à des questions cruciales pour la gestion des eaux souterraines de plus en plus sollicitées par l'agriculture et les besoins humains. Les observatoires sont situés à Ploemeur (Morbihan) pour les nappes en roches cristallines fracturées, au Larzac et au Baget (Ariège) pour des karsts, à Poitiers (Vienne) pour des sols sédimentaires et à Auverwatch pour l'observation de la nappe alluviale de l'Allier. Objectif: comprendre le rôle des écoulements d'eau dans le sous-sol et leurs impacts sur les cycles hydrologiques et biogéochimiques. Mais aussi comment la recharge par les eaux de pluies, les échanges entre la rivière et les nappes alluviales ainsi que les remontées d'eau profonde sont connectés. Sans oublier la recension des organismes vivant dans ces milieux rocheux fracturés.

gré des périodes de glaciation et de déglaciation. Mais pour la première fois, des chercheurs sont là pour étudier les mécanismes de reconquête de lieux hostiles à la vie. Pour Jérôme Poulenard, c'est une occasion unique de voir comment les plantes arrivent à coloniser des zones rocheuses sans sol. « *En moins de dix ans, on voit s'installer des plantes comme l'épilobe des moraines, une vivace qui pousse jusqu'à 2700 mètres d'altitude,* détaille le chercheur. *Le substrat étant très pauvre, on voit aussi arriver des légumineuses qui, grâce à la symbiose bactérienne, peuvent capter l'azote de l'air comme le trèfle pâlissant* Trifolium pallescens. » C'est toute la théorie de la « terrestrialisation » des végétaux aquatiques il y a 500 millions d'années qui est ainsi mise à l'épreuve. Les évolutionnistes ont élaboré un scénario où des algues vivant dans des mares de faible profondeur ont pu s'enraciner dans des substrats rocheux avec l'aide de bactéries et surtout de champignons mycorhiziens qui les ont aidés à élaborer un sol fertile, première étape de la conquête des continents par les végétaux.

Les successions d'organismes vivants constatées sur les terres libérées par les glaces épousent ces hypothèses. « *Ainsi, les plantes pionnières sont toutes en symbiose avec des champignons mycorhiziens* », constate Jérôme Poulenard. Le chercheur se trouve donc au bon moment sur un terrain d'observation privilégié qui en fait un membre très actif de l'observatoire de la zone critique (Ozcar). Ce réseau de laboratoires en plein air étudie les interactions entre l'atmosphère, les sols, les couches géologiques, les organismes vivants dans cette étroite bande entre les basses couches de l'atmosphère et les 100 premiers mètres de la croûte terrestre où se concentre la vie *(lire l'encadré ci-dessus)*. Les désastreux reculs des glaciers auront au moins cet avantage de nous ramener aux premiers âges terrestres. ■ **Loïc Chauveau**



Le recul des glaciers alpins entraîne au fil des ans une modification des écosystèmes : prairies, forêts, lacs émergent peu à peu dans de plus hautes altitudes (schéma type).

BRUNO BOURGEOIS - SOURCE : NATURE

PUBLICITÉ

Cholestérol : attention aux excès !

Le cholestérol est indispensable à l'organisme. Constituant fondamental des membranes cellulaires, il permet aussi de fabriquer la testostérone, les oestrogènes ainsi que la vitamine D. Cependant, un excès de cholestérol peut entraîner la formation de dépôts, appelés plaques, sur les parois des artères.

Cholestérol et stress oxydatif : un facteur aggravant

Les résultats des dernières études scientifiques montrent que le stress oxydatif est un facteur aggravant pour la formation de ces plaques. Il déclenche une réaction immunitaire faisant intervenir des globules blancs qui viennent s'ajouter aux dépôts de cholestérol, augmentant l'épaisseur de la plaque.

Qu'est-ce que le stress oxydatif ?

Le fonctionnement normal de l'organisme génère des radicaux libres, des particules très énergétiques essentielles au bon fonctionnement de l'organisme, mais qui peuvent endommager les cellules lorsqu'elles sont en excès, si elles ne sont pas neutralisées par des antioxydants. On parle alors de stress oxydatif.

Préserver naturellement la santé cardiovasculaire

L'apport d'actifs naturels, par l'alimentation et/ou par une supplémentation, peut aider à réguler les taux de cholestérol et à diminuer le risque de formation de plaques.

Connaissez-vous l'ail noir ?

L'ail noir est obtenu par un processus de maturation permettant de concentrer les principes bioactifs de l'ail. Il est ainsi 10 fois plus riche en antioxydants que l'ail frais.

Innovation pour lutter contre le cholestérol

ControlStérol aide à réguler naturellement les taux de cholestérol grâce à une combinaison unique d'extraits concentrés d'Ail noir riche en antioxydants et de Cannelle de Ceylan, associés à une souche brevetée de ferments lactiques, des vitamines et des nutriments essentiels. Une gélule « jour » et une gélule « nuit » aident à limiter le «mauvais» cholestérol LDL et son oxydation, limitant le risque cardiovasculaire associé, tout en augmentant le «bon» cholestérol HDL. **Une solution naturelle, simple, efficace !**

Des conseils ?

Les experts PhytoResearch vous répondent au **01 85 49 34 12** ou sur **www.controlsterol.com**

ControlStérol™
régulateur de cholestérol naturel

Disponible en pharmacie

ControlStérol boîte 60 gélules végétales (30 gél "jour" & 30 gél "nuit") ACL 626 04 90 - Convient aux végétaliens

Thyroïde

Alerte aux traitements inutiles

Les dysfonctionnements de la glande thyroïdienne — essentielle à l'organisme — entraînent très souvent une cascade d'examens et de traitements qui pourraient être réduits et mieux adaptés. La moitié des 30 000 ablations annuelles de la thyroïde en France seraient ainsi évitées ! Aujourd'hui, l'heure est à la désescalade.

Par Sylvie Riou-Milliot

C'est une toute petite glande en forme de papillon de quelques centimètres pesant environ 20 grammes. Elle est pourtant une clé de voûte de notre organisme. Il y a tout juste six ans, la thyroïde ou plutôt les hormones qu'elle sécrète étaient au cœur de la fameuse « affaire » du Levothyrox. Une nouvelle formule du médicament modifiant l'un de ses constituants — un excipient, pas le principe actif — avait été le point de départ d'un véritable imbroglio sanitaire et judiciaire *(lire l'encadré p. 68)*. Parfois en effet, tout se dérègle dans cette structure située juste devant le larynx. Le plus souvent en raison de l'âge, d'antécédents familiaux thyroïdiens ou d'une alimentation carencée en iode. Apparaissent alors au cœur de la glande des nodules. Très fréquents, présents chez une femme sur deux après 50 ans, ils se découvrent soit à la palpation, soit fortuitement lors d'une échographie demandée pour une tout autre raison. Car les signes de dérèglement de cette glande — l'hypothyroïdie ou l'hyperthyroïdie *(voir l'infographie ci-contre)* — n'apparaissent que dans 15 % des cas.

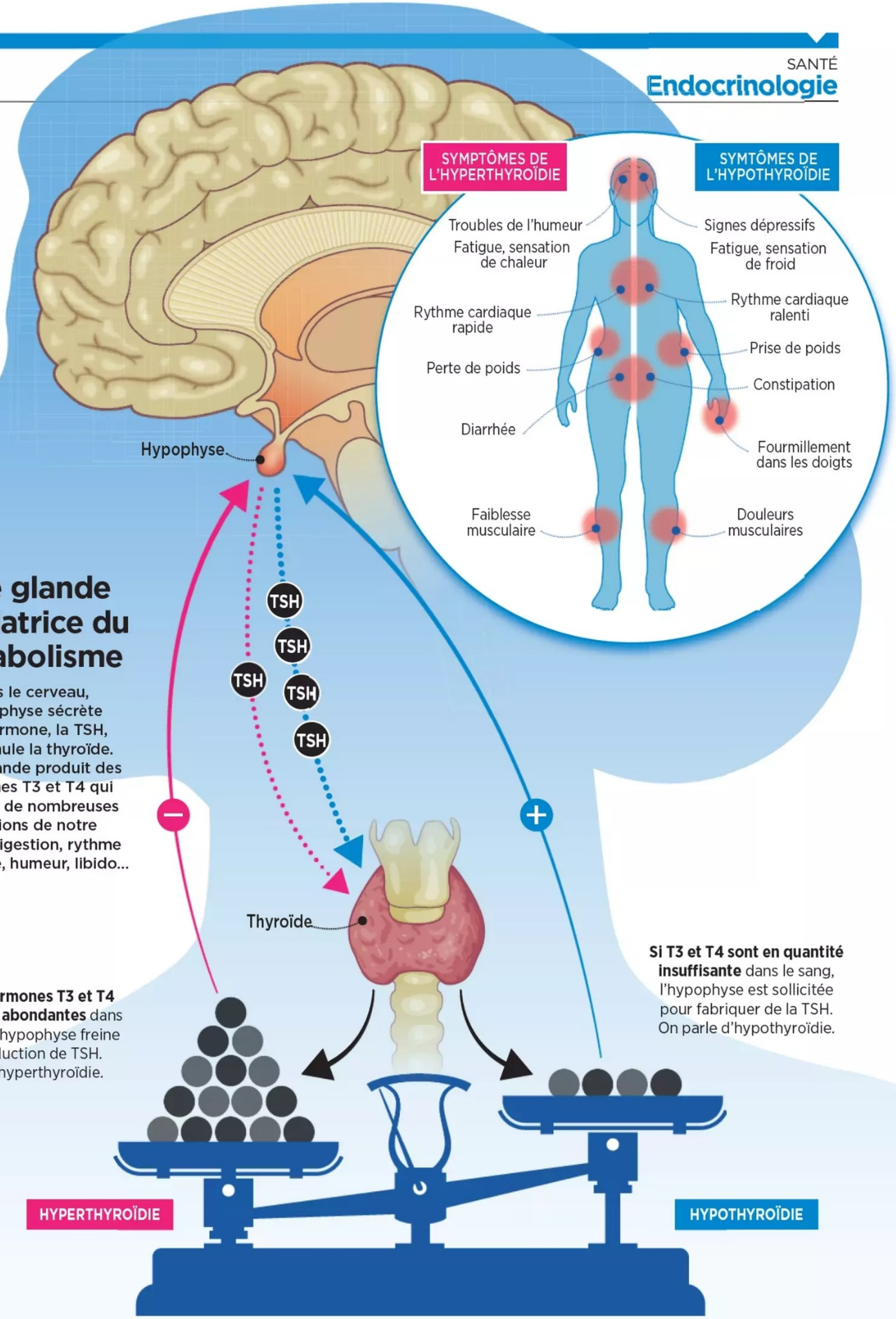
Selon leur taille et leur localisation, les nodules peuvent aussi s'avérer plus ou moins gênants (déglutition, parole). Mais en cas de suspicion de malignité et ce malgré un bilan complet (échographie,

Une glande régulatrice du métabolisme

Dans le cerveau, l'hypophyse sécrète une hormone, la TSH, qui stimule la thyroïde. Cette glande produit des hormones T3 et T4 qui régulent de nombreuses fonctions de notre corps : digestion, rythme cardiaque, humeur, libido...

Si les hormones T3 et T4 sont trop abondantes dans le sang, l'hypophyse freine la production de TSH. C'est l'hyperthyroïdie.

Si T3 et T4 sont en quantité insuffisante dans le sang, l'hypophyse est sollicitée pour fabriquer de la TSH. On parle d'hypothyroïdie.



BRUNO BOURGEOIS

1 femme sur 2 présente un nodule après 50 ans.

90 % des nodules thyroïdiens sont bénins.

10 000 à 15 000 thyroïdectomies évitables par an en France.

30 % des nodules suspects restent indéterminés.

SOURCE : HAUTE AUTORITÉ DE SANTÉ

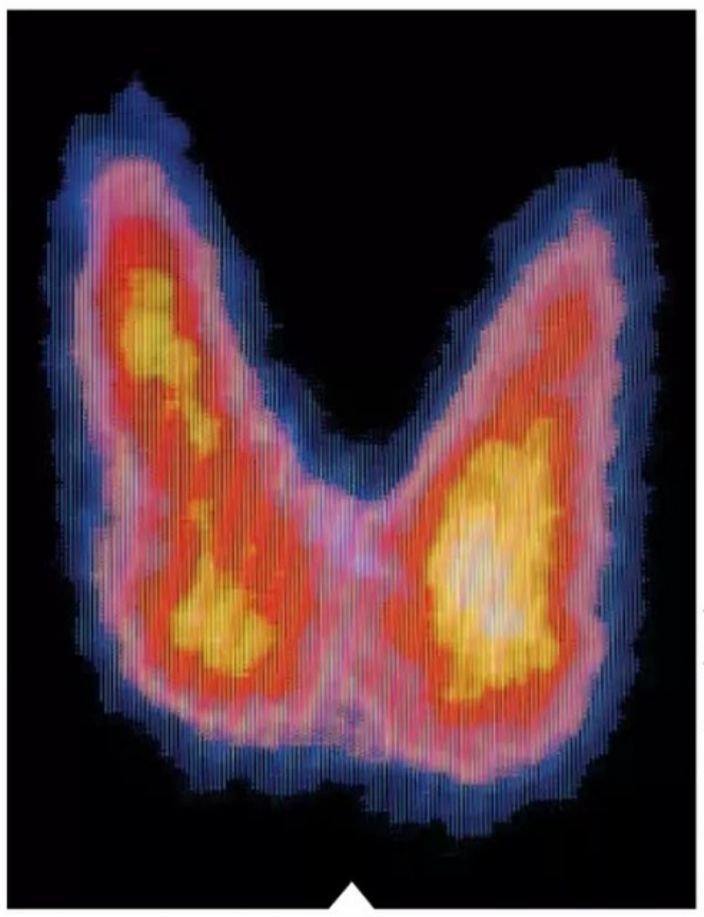
cytoponction à l'aiguille, parfois scintigraphie), le doute peut persister sur leur nature cancéreuse dans 30 % des cas. Ces situations complexes posent en pratique des questions difficiles de prise en charge. S'il s'agit d'un cancer, est-ce une forme lente ou agressive ? Si un nodule est potentiellement malin mais tout petit, faut-il forcément le retirer ? En sachant que cela expose le patient aux risques secondaires (cicatrice, modification de la voix dans 4 % des cas) ainsi qu'à un traitement substitutif hormonal à vie. Ou bien peut-on se contenter d'une simple surveillance régulière, comme face à certains cancers de la prostate ?

Le signal d'alarme a été tiré dès 2013

Autant de questions qui animent depuis déjà plusieurs années la communauté des endocrinologues, réunie l'automne dernier à Milan (Italie) lors du 45e congrès de l'Association européenne de la thyroïde (ETA, European Thyroid Association). Ces situations complexes ont une conséquence grave : le recours à des chirurgies non essentielles, pratiquées chez des patients dont les nodules auraient pu être laissés en place. On estime que, sur un total d'environ 30 000 ablations (thyroïdectomies) réalisées par an en France pour toutes raisons confondues (cancers, goitres, nodules), 10 000 à 15 000 d'entre elles pourraient être évitées. *« Nous sommes face à un problème de santé publique et à un double défi, car il s'agit dans le même temps d'éviter les examens et traitements inutiles tout en ne passant pas à côté d'un cancer à risque de récidive ou de décès »*, résume le Pr Françoise Borson-Chazot, endocrinologue à Lyon et coordinatrice d'un récent consensus national, validé depuis sur le plan européen.

Et la spécialiste de poursuivre : *« On a beaucoup appris de l'affaire Levothyrox en prenant conscience de la fréquence des traitements inutiles, beaucoup de patients ayant arrêté ces médicaments sans nécessité ensuite de les reprendre. Aujourd'hui, l'heure est clairement à la désescalade, tant pour les examens que pour les traitements. »* Dosages d'hormones thyroïdiennes systématiquement demandés quand, en fait, seul compte celui de la thyréostimuline (TSH), échographies prescrites sans nodule décelable à la palpation, bilans préopératoires incomplets (deux sur trois) sans cytoponction permettant pourtant l'analyse précise des cellules du nodule, prises inutiles d'hormones thyroïdiennes au long cours sans dosage préalable de TSH (30 % des cas)… Autant de pratiques pour le moins peu adaptées.

Voilà plus de dix ans que les autorités sanitaires ont tiré le signal d'alarme par le biais d'une étude de la Caisse nationale d'assurance-maladie parue en 2013, qui pointait certains de ces dysfonctionnements. Depuis, la Haute Autorité de santé (HAS) a régulièrement produit différents documents visant à recadrer les pratiques : en 2019, une fiche avec dix messages courts ; puis en 2021, une autre sur la pertinence des examens d'imagerie.



CHRIS PRIEST/SPL/SUCRÉ SALÉ

Scintigraphie d'une glande thyroïde humaine saine.

Un ciblage plus fin pour limiter la chirurgie

Mais les habitudes ont la vie dure et les changements toujours longs à mettre en place, le réflexe bistouri étant parfois un peu rapide. À la suite d'un consensus de la Société française d'endocrinologie paru fin 2022, la HAS a, elle, publié en mars 2023 un autre socle complet de recommandations à propos des dysthyroïdies. Soit un document arguant que *« la prise en charge et le suivi n'étaient pas toujours optimaux »* et insistant par exemple sur une prise en charge plus adaptée en tenant compte des préférences des patients, sans recours systématique à l'imagerie ou aux traitements. *« La chirurgie ne devrait être pratiquée qu'en dernier recours et en présence d'un goitre volumineux compressif ou en cas de suspicion de malignité, ou encore si un traitement par iode radioactif n'est pas adapté,* rappelle le Dr Camille Buffet, endocrinologue à l'hôpital de la Pitié-Salpêtrière, à Paris. *Déjà, le recours à la thyroïdectomie totale a tendance à reculer au profit de lobectomies partielles, ce qui réduit la fréquence du recours au traitement substitutif hormonal. »* De plus, d'autres techniques se développent, réalisées sous anesthésie locale et n'occasionnant pas de cicatrices, comme la thermoablation *(lire ci-contre)*.

Par ailleurs, pour limiter au mieux les chirurgies, *« la mise au point de tests moléculaires pratiqués lors de la cyto-*

AP-HM/CHRISTOPHE ASSO

Cette technique permet de détruire les nodules en préservant la thyroïde (ici à l'hôpital de la Conception, à Marseille).

TRAITEMENT

Les bénéfices de la thermoablation

Comment réduire les conséquences de la chirurgie traditionnelle ? Par des alternatives, comme la thermoablation. Quatre techniques sont disponibles : les trois les plus utilisées ont été développées au cours des vingt dernières années en Italie (laser), en Corée du Sud (radiofréquence) et en Chine (micro-ondes). Elles sont disponibles en France dans une vingtaine de centres. Ces différents mécanismes permettent de détruire un nodule thyroïdien bénin sans toucher au tissu sain alentour, donc sans avoir à retirer la glande. Principal avantage pour le patient, outre l'absence de cicatrice et d'anesthésie générale : pouvoir se passer du traitement substitutif hormonal à vie, la prise d'hormones thyroïdiennes étant souvent nécessaire en cas de chirurgie traditionnelle.
En pratique, il s'agit, en ambulatoire et sous anesthésie locale, d'introduire sous guidage échographique dans le centre du nodule une sonde administrant de la chaleur. *« L'augmentation de la température locale (environ 85 °C) permet de dénaturer les protéines tissulaires, de provoquer la sclérose des vaisseaux et même la carbonisation »*, précise le Dr Hervé Monpeyssen (Institut de la thyroïde, Paris), pionnier de la technique dans l'Hexagone après s'être formé en Italie et en Corée. Le choix de la technique dépend de plusieurs facteurs : volume et nombre des nodules, emplacement dans la glande, proximité éventuelle de nerfs, vaisseaux… La procédure dure environ trente minutes et la surveillance au maximum deux heures, le patient rentrant chez lui le soir même.
Principale indication de cette approche, les nodules bénins qui, une fois retirés, diminuent progressivement de volume dans les mois qui suivent le geste. *« Mais attention,* prévient Hervé Monpeyssen, *on ne se décrète pas thermoablateur du jour au lendemain, une formation rigoureuse est requise.* » Tous les nodules ne sont toutefois pas accessibles à ce traitement en raison de contre-indications. Autre inconvénient : son coût d'environ 2000 euros qui n'est toujours pas pris en charge en France, à l'inverse de la Corée et de l'Italie. Certaines mutuelles commencent néanmoins à s'y intéresser, le dossier de remboursement étant à l'étude. À terme, cette approche devrait aussi être étendue aux nodules malins, comme cela a déjà été réalisé dans certains centres experts comme l'hôpital de la Pitié-Salpêtrière, à Paris, ou l'Hôpital américain de Neuilly.

SCANDALE SANITAIRE

L'affaire Levothyrox en 10 dates

Mars 2017 Décision du laboratoire Merck de passer de l'Euthyrox au Levothyrox.

Juin 2017 Lancement d'une pétition qui recueillera des milliers de signatures de patients déclarant de nombreux effets secondaires.

Mars 2018 Ouverture d'une information judiciaire contre X pour *« tromperie aggravée, blessure involontaire et mise en danger d'autrui ».*

Juillet 2018 Étude de l'Agence nationale de sécurité du médicament qualifiant d'*« infondées »* les critiques vis-à-vis du Levothyrox.

Avril 2019 Publication dans la revue *Clinical Pharmacokinetics* d'une étude de l'Inserm donnant raison aux patients.

Janvier 2020 Annonce par le ministère de la Santé du retrait définitif de l'Euthyrox en septembre 2020.

Juin 2020 Condamnation en appel du laboratoire Merck à verser 1000 euros à chaque dossier de plainte.

Octobre et décembre 2022 Mises en examen de Merck pour *« tromperie aggravée »* puis de l'ANSM pour *« tromperie ».*

Septembre 2023 Annonce par le laboratoire d'un retour de la mise à disposition de l'Euthyrox jusqu'en 2025 inclus.

2024 Procès au pénal ?

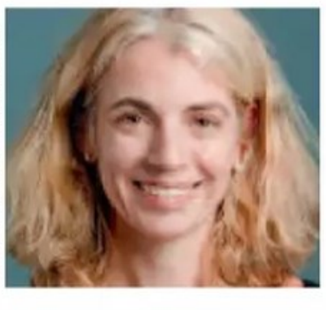
Tout a commencé par un simple changement d'excipient. Pour finir par *« un sacré cafouillage et surtout un très grand gâchis »*, résumait en octobre 2023 à Milan (Italie) Beate Bartès, présidente de l'association Vivre sans thyroïde (VST*). Après avoir, dès le printemps 2017, prévenu le laboratoire et l'Agence nationale de sécurité du médicament (ANSM), elle n'a cessé de défendre les patients. Car son forum d'information — crée en 2000 à la suite de l'ablation de sa propre thyroïde et traitant de tous les dysfonctionnements de la glande — croulait alors sous des centaines de messages. *« Les patients ont été mal informés, pas écoutés, le laboratoire et les autorités ayant eu tendance à minimiser systématiquement leurs plaintes »*, se souvient-elle. Avec plus de 10 000 plaintes et 3000 parties civiles, les procédures sont en cours, la date du procès en attente et le mystère toujours entier.

• sciav.fr/923VST

ponction est aussi en cours pour sélectionner les nodules suspects à opérer quand l'analyse cytologique [des cellules] ne permet pas de trancher sur la nature bénigne ou cancéreuse du nodule », précise Camille Buffet. La spécialiste participe également à une étude multicentrique, Mibi-Thyr. Coordonné à Nantes par le Dr Éric Miraillié, ce travail repose sur la scintigraphie, un examen d'imagerie qui, après injection de deux traceurs faiblement radioactifs (iode 123 et Mibi), fournit une image de la glande du ou des nodules douteux. L'objectif est, là encore, de voir si ces traceurs, le Mibi et l'iode 123, permettent de mieux sélectionner les patients à opérer et d'éviter les chirurgies pour des nodules finalement bénins.

Surveiller certains cancers sans recourir à l'iode radioactif

Sur un tout autre versant, médico-économique cette fois, une autre étude, Costimabl2, vient de démarrer à l'institut Gustave-Roussy, à Villejuif (Val-de-Marne). Elle s'inscrit dans la suite des résultats d'un important essai clinique français, Estimabl2, qui a abouti à modifier les pratiques en cours depuis plus d'un demi-siècle en réduisant le recours à l'iode radioactif dans certaines formes de cancers, ceux à faible risque de rechute. Publié en 2022 dans la revue *New England Journal of Medicine*, il a démontré que, pour ces cancers, les plus fréquents, il était possible de se contenter d'une simple surveillance sans recourir à l'iode. *« Avec Costimabl2, en appariant de manière anonyme les données des 776 patients d'Estimabl2 à celles de l'Assurance-maladie, nous devrions confirmer que cette stratégie, en évitant une hospitalisation, est moins coûteuse pour la société »*, détaille Isabelle Borget, professeure en économie de la santé en charge de l'étude. Résultats prévus dans deux ans. Des bienfaits de la désescalade donc, tant sanitaires qu'économiques. ■



GEOL ALEX BONNEMAISON

« Cette stratégie, en évitant une hospitalisation, est moins coûteuse pour la société »

Isabelle Borget, professeure en économie de la santé

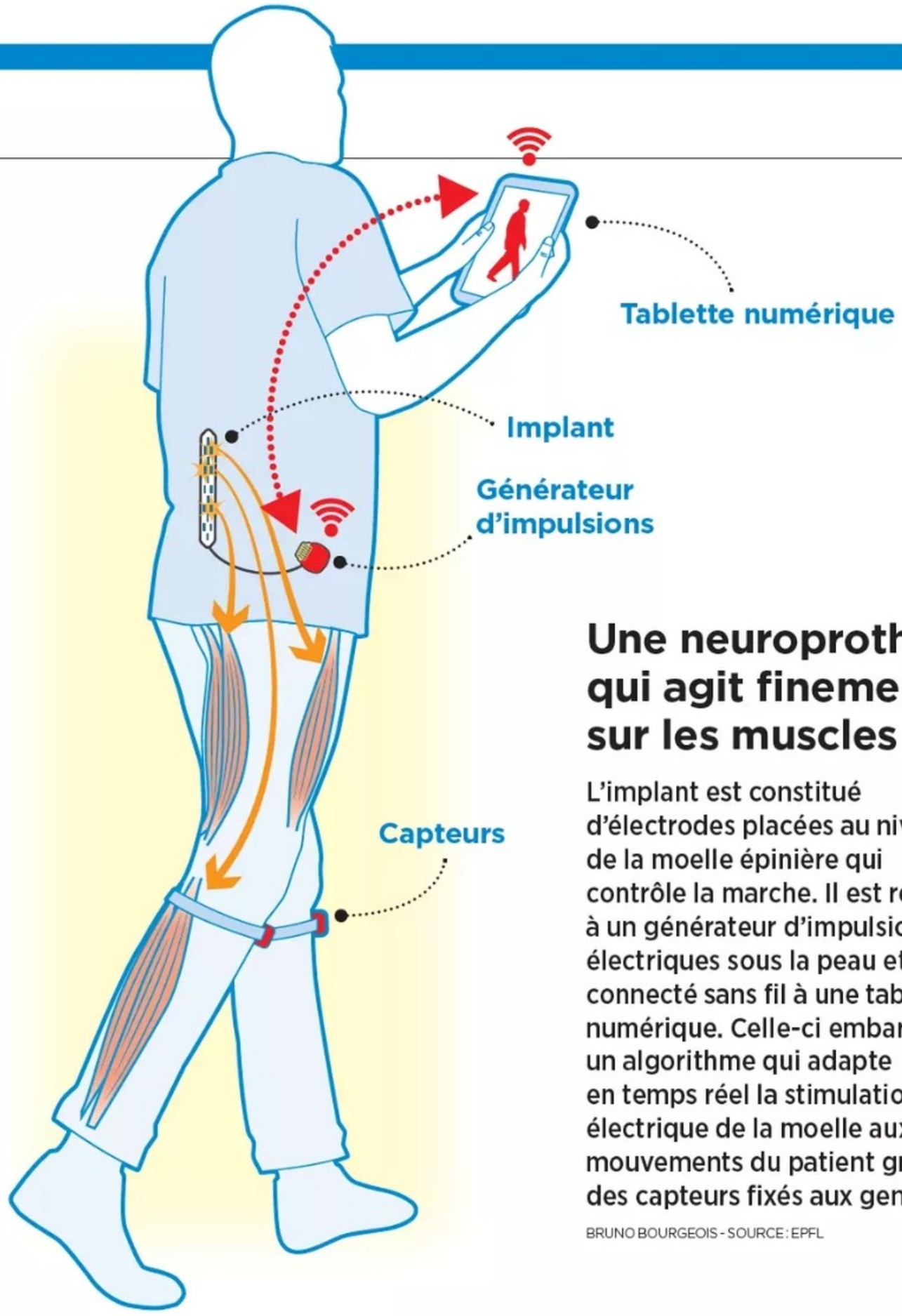
JIMMY RAVIER/NEURORESTORE

Chronophotographie du patient équipé de la neuroprothèse des chercheurs suisses de NeuroRestore au cours d'un test de marche.

Un implant aide à marcher avec Parkinson

Pour la première fois, un patient atteint de la maladie de Parkinson a bénéficié d'un dispositif stimulant sa moelle épinière pour lui permettre de retrouver une démarche fluide et éviter les chutes.

Un petit implant pour un homme, mais un pas de géant contre les dégâts de la maladie de Parkinson. La plateforme scientifique NeuroRestore à l'École polytechnique fédérale de Lausanne (EPFL) en Suisse, dirigée par le professeur de neurosciences Grégoire Courtine, a testé avec succès son dispositif de stimulation de la moelle épinière pour corriger les troubles de la marche qui affectent environ 90 % des personnes à un stade avancé de cette maladie neurodégénérative. C'est en effet cette même neuroprothèse développée par l'équipe suisse qui a déjà permis de rendre l'usage de leurs jambes à des personnes devenues paraplégiques à la suite d'une lésion de la moelle *(lire* S. et A. *n° 917/918)*. Cette fois, avec la maladie de Parkinson, la stimulation électrique fournie par l'implant ne palie pas une coupure dans la communication nerveuse à cause d'une lésion, mais normalise le signal nerveux envoyé aux muscles des jambes par le cerveau. Ce signal est en effet perturbé par les dommages neurologiques causés par Parkinson. Dans cette maladie neurodégénérative, si le cerveau parvient bien à envoyer des commandes aux muscles des jambes, certains de ces muscles ne sont pas assez activés et il peut donc survenir des problèmes de synchronisation dans l'activation des deux jambes. C'est ce qui est arrivé à Marc, 63 ans, diagnostiqué à l'âge de 36 ans. Architecte et ancien maire de la petite commune de Saint-Michel-de-Rieufret (Gironde) de 2008 à 2020 malgré sa maladie, c'est lui qui a bénéficié de l'implant pour la première fois dans cette indication. Et c'est à lui qu'on doit le résultat spectaculaire, issu d'une collaboration entre l'EPFL, le centre hospitalo-universitaire Vaudois (CHUV), en Suisse, et l'université de Bordeaux, présenté dans la revue *Nature Medicine*. Le Bordelais avait d'abord été traité avec de la dopamine — comme la plupart des patients — puis, à partir de 2004, par stimulation cérébrale profonde. Cette stratégie consiste à



Une neuroprothèse qui agit finement sur les muscles

L'implant est constitué d'électrodes placées au niveau de la moelle épinière qui contrôle la marche. Il est relié à un générateur d'impulsions électriques sous la peau et connecté sans fil à une tablette numérique. Celle-ci embarque un algorithme qui adapte en temps réel la stimulation électrique de la moelle aux mouvements du patient grâce à des capteurs fixés aux genoux.

BRUNO BOURGEOIS - SOURCE : EPFL

▶ implanter des électrodes dans les noyaux subthalamiques, au cœur du cerveau, pour les stimuler en continu et supprimer ainsi des symptômes tels que les tremblements caractéristiques de la maladie.

Des problèmes d'équilibre et d'asymétrie

Malgré ces traitements, Marc a fini par développer de graves troubles de la marche, avec notamment une tendance à la chute, des problèmes d'équilibre et d'asymétrie — car sa jambe droite était plus affectée — ainsi que des événements fréquents d'enrayage cinétique, aussi appelé « freezing », lorsque la démarche est interrompue involontairement. « *Je n'arrivais pratiquement plus à marcher sans des chutes fréquentes, plusieurs fois par jour,* raconte-t-il. *Dans certaines situations, comme entrer dans un ascenseur, je piétinais, je faisais du* freezing, *comme on dit.* »

Pour tenter de traiter ces troubles de la marche, les équipes de Grégoire Courtine ont donc adapté leur implant de stimulation de la moelle épinière aux spécificités de la maladie de Parkinson. Grâce notamment à l'expertise du neuroscientifique Erwan Bézard (Inserm, CNRS et université de Bordeaux), spécialiste des maladies neurodégénératives. Cette neuroprothèse est constituée d'un champ d'électrodes placé contre la région de la moelle épinière qui contrôle la marche. Celui-ci est relié à un générateur d'impulsions électriques implanté sous la peau de l'abdomen et connecté sans fil à une tablette numérique. Dans celle-ci, un algorithme adapte en temps réel la stimulation électrique de la moelle aux mouvements du patient, grâce à des capteurs fixés aux genoux qui permettent de synchroniser la stimulation avec la démarche. Ainsi, les électrodes de l'implant stimulent les fibres nerveuses qui contrôlent les muscles des jambes en imitant leur profil naturel d'activation lors de la marche. Cet algorithme est entraîné avec les premiers pas quand le patient commence à marcher et prend ensuite le dessus pour automatiser le mouvement. En plus de normaliser la marche, l'implant stimule les fessiers pour améliorer la stabilité et éviter les chutes. « *Il est impressionnant de constater qu'en stimulant électriquement et de façon ciblée la moelle épinière, de la même façon que nous l'avons fait chez les patients paraplégiques, on arrive à corriger les troubles de la marche dus à la maladie de Parkinson* », se réjouit la Pr Jocelyne Bloch, neurochirurgienne au CHUV, et codirectrice du centre NeuroRestore avec Grégoire Courtine.

Marc a reçu l'implant il y a deux ans, et après deux mois d'entraînement seulement, il avait déjà retrouvé une démarche presque normale. Désormais, il utilise cette stimulation environ huit heures par jour, ne l'éteignant

PERSPECTIVE

Un implant cérébral pour gagner en confort

Actuellement, Marc doit activer manuellement son implant en utilisant un logiciel dédié. Mais, à terme, l'objectif est de libérer les utilisateurs de cette étape en leur permettant de démarrer la stimulation rien qu'en y pensant. Pour cela, les chercheurs veulent adapter le « pont digital » qu'ils ont déjà testé avec succès chez un patient tétraplégique en mai 2023. Chez les personnes atteintes de Parkinson qui sont déjà traitées par stimulation cérébrale profonde, l'implant qui permet cette stimulation cérébrale (et qu'ils ont donc déjà) pourrait être utilisé pour « lire » leur cerveau et envoyer leurs ordres à l'implant de la moelle épinière, rendant encore plus facile le contrôle de la marche.

que lorsqu'il est assis pour une longue période ou lorsqu'il dort : *« J'allume la stimulation le matin et je l'éteins le soir. Ça me permet de mieux marcher, de me stabiliser. Même les escaliers ne me font plus peur à présent. Et tous les dimanches, je vais au bord du lac et je marche environ six kilomètres. C'est génial ! »* Prudence toutefois : si cette technologie semble très efficace chez ce patient pour traiter ses troubles de la marche, les chercheurs préviennent que cela ne signifie pas forcément qu'elle fonctionnera aussi bien avec tous les autres atteints de cette même maladie.

Ajuster le dispositif pour le faire évoluer avec la maladie

La prochaine étape sera donc de confirmer ces résultats dans un essai clinique chez six patients, grâce à un financement d'un million de dollars donné par la Fondation Michael J. Fox pour la recherche sur Parkinson. Pour cet essai clinique, le recrutement ciblera des volontaires qui, comme Marc, sont déjà soignés avec de la dopamine et de la stimulation cérébrale profonde et qui ont développé des troubles de la marche malgré ces traitements. Les chercheurs envisagent dans le futur d'utiliser cet implant pour des patients trop âgés pour recevoir la stimulation profonde — déconseillée aux personnes de plus de 70 ans — et dont les problèmes causés par la maladie de Parkinson sont principalement liés à la marche.

En plus de vérifier si les résultats très encourageants observés chez Marc peuvent être généralisés à d'autres patients, il reste à déterminer la durée d'efficacité de cet implant. Car la maladie de Parkinson est une pathologie dégénérative, qui implique une aggravation inévitable des lésions neuronales avec le temps. Grégoire Courtine et son équipe pensent qu'il sera probablement nécessaire d'ajuster le fonctionnement de l'implant pour l'adapter à ces aggravations. Une des améliorations possibles du fonctionnement de cette technologie est ce que les neuroscientifiques appellent un « pont digital », une connexion entre l'implant dans la moelle épinière du patient et un deuxième implant dans son cerveau *(lire l'encadré p. 70)*. Autrement dit : permettre un contrôle de l'implant grâce à une lecture des intentions dans le cerveau. Ce pont digital permettrait en théorie de mieux synchroniser la stimulation des muscles des jambes avec la volonté du patient de marcher. Il a déjà été testé chez trois singes avec des résultats positifs. Des électrodes placées sur le cortex moteur de ces animaux lisaient les signaux neuronaux de cette région du cortex, et envoyaient ces ordres du cerveau vers l'implant de la moelle épinière afin de l'activer, sans fil et en temps réel. Le chemin est encore long, mais cette technologie pourrait constituer un pas déterminant vers la fin des troubles de la marche causés par la maladie de Parkinson. ■

Nicolas Gutierrez C.

CHUV 2023/ WEBER GILLES

3 QUESTIONS À

GRÉGOIRE COURTINE

NEUROSCIENTIFIQUE À L'ÉCOLE POLYTECHNIQUE FÉDÉRALE DE LAUSANNE (SUISSE) ET COFONDATEUR DE NEURORESTORE

« La stimulation se fait plus précise pour des mouvements compliqués »

L'implant améliore la démarche, mais il facilite aussi d'autres mouvements. Comment adapte-t-il sa stimulation aux divers besoins ?
Une fois que Marc allume le système, la stimulation est en continu pour la plupart des mouvements liés à la marche. Mais elle se fait plus précise pour certains mouvements plus compliqués comme monter des escaliers. C'est surtout là que les capteurs aident : ils détectent quand le pied monte et descend, et l'IA qui gère le système utilise cette information pour apprendre à reconnaître quel mouvement Marc veut faire, en fonction de la manière dont il monte le pied. Nous travaillons sur des chaussures connectées qui faciliteront encore ce processus.

Comment l'implant permet-il aussi d'éviter le « freezing »* [blocage involontaire]*, qui est plutôt un problème cognitif ?
En effet, le *freezing* apparaît quand le cerveau se bloque avant de faire un pas. On ne sait pas exactement comment la stimulation aide dans ce cas, mais on observe qu'elle permet d'éviter ces blocages. Notre hypothèse est que l'électrode, de par sa stimulation, active le cerveau et le débloque pour éviter ainsi ces problèmes. C'est ce qu'on essaie actuellement de prouver.

Outre la restauration de la marche, vous aviez observé une régénération partielle de la moelle épinière chez les patients paraplégiques utilisant cet implant. Avez-vous observé un effet similaire chez Marc ?
Après l'utilisation de l'électrode, nous voyons une amélioration neurologique du patient, notamment pour ce qui concerne la marche et l'équilibre. Cela ne guérit pas la maladie de Parkinson, mais ça améliore l'état neurologique du patient.

Propos recueillis par N. G. C.

Le poisson, à consommer sous conditions

Bonne source de vitamines, de nutriments et d'acides gras, les poissons cumulent les avantages. Mais la pollution des océans ou le mode d'élevage peuvent en altérer les qualités.

Bar, sole, lotte… Les fêtes de fin d'année sont une bonne occasion de laisser de côté chapon et gibier pour mettre à l'honneur le poisson dans nos assiettes. Avec raison, car il possède de multiples vertus nutritionnelles. Mais sa chair délicate et iodée séduit aussi tout au long de l'année. Les Français en consomment en moyenne 33,5 kg par habitant et par an. Avec une préférence, en matière de poisson frais, pour le saumon, le cabillaud et le lieu noir (1). Toutefois, tout n'est pas toujours bon dans le poisson. La pollution des océans ainsi que le mode d'élevage sont à prendre en compte. Revue de détails.

Une bonne source d'iode et de vitamine D…

Certains poissons apportent de grandes quantités d'iode, indispensable à la fabrication des hormones thyroïdiennes. C'est le cas de l'églefin qui en fournit 260 microgrammes pour 100 g, soit presque deux fois plus que les apports nutritionnels conseillés (fixés à 150 µg par jour pour un adulte), du mulet (190 µg/100 g) ou encore du cabillaud (110 µg/100 g). Consommer du poisson contribue aussi aux apports en vitamine D, qui, outre des actions sur le métabolisme osseux, régule la transmission nerveuse, la contraction musculaire et le système immunitaire. L'espadon en renferme 16,6 µg/100 g (l'équivalent des apports quotidiens conseillés chez l'adulte) ; la sardine, 7,56 µg/100 g et le saumon fumé, 5,45 µg/100 g (2).

46 903 tonnes

de poissons d'élevage français ont été vendues en 2020 en France, contre 461 000 tonnes de poissons frais ou congelés issus de la pêche française.

(SOURCE : FRANCE AGRIMER, 2022.)

… et de nombreux autres nutriments

La chair de poisson est une source appréciable de phosphore (240 mg/100 g de cabillaud cuit à la vapeur), de potassium,

BERNARD MARTINEZ POUR SCIENCES ET AVENIR - LA RECHERCHE

OMÉGA 3 Acides gras polyinsaturés comprenant les acides alphalinoléique (ALA), eicosapentaénoïque (EPA) et docosahexaénoïque (DHA). Ces deux derniers sont surtout présents dans les poissons bleus.

PCB OU POLYCHLOROBIPHÉNYLES Composés aromatiques utilisés pour l'isolation électrique et pour leurs propriétés ignifugeantes (encres, peintures et plastiques). Interdits depuis 1987, ils persistent dans l'environnement.

MÉTHYLMERCURE Cette forme de mercure peut se concentrer dans les organismes aquatiques dont la teneur s'élève au fil de la chaîne alimentaire. À hautes doses, il est toxique pour le système nerveux central.

de zinc (0,58 mg/100 g de sole rôtie), de cuivre et de sélénium (50 µg / 100 g de rouget-barbet). Pour 100 g de sardines à l'huile, comptez également 1,97 mg de fer, 333 mg de calcium, 1,44 mg de vitamine E et 13,6 µg de vitamine B12.

Leurs acides gras, protecteurs de nombreuses affections

Les poissons dits bleus (ou gras, hareng, sardines, saumon, etc.) sont intéressants pour leur richesse en **oméga 3**. Un pavé de saumon d'élevage couvre les besoins journaliers recommandés en acide eicosapentaénoïque (EPA) et en acide docosahexaénoïque (DHA). Ainsi, la consommation de deux boîtes de sardines par semaine pendant un an permettrait de prévenir l'apparition du diabète de type 2 (3), quand celle de 175 grammes de poissons gras par semaine diviserait par six le risque d'accident cardio-vasculaire et de décès lié à une maladie cardiaque chez les personnes ayant une maladie cardio-vasculaire ou celles ayant un risque élevé d'en être atteintes (4). Par ailleurs, avoir un taux sanguin élevé d'oméga 3 de type DHA diminuerait de 49 % le risque de développer la maladie d'Alzheimer chez les personnes les plus à risque (5).

Varier les espèces

En raison de la pollution des océans, de nombreuses espèces de poissons renferment des contaminants chimiques. Les dioxines et les **PCB** se retrouvent préférentiellement dans les poissons les plus gras, comme les anguilles et d'autres dits bioaccumulateurs (barbeau, brème, carpe, silure). Le **méthylmercure** est quant à lui présent dans les poissons prédateurs sauvages tels que le thon, la lotte ou la dorade. Ces polluants étant préférentiellement stockés dans les graisses, les poissons maigres (cabillaud, julienne, merlan, lieu noir, carrelet) ont moins de risque d'être contaminés. D'ailleurs, l'Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation (Anses) recommande de varier les espèces et les lieux d'approvisionnement (6), ce qui permet également de préserver la biodiversité marine. Préférez si possible les petits poissons aux stocks abondants (sardine, anchois, maquereau…), ceux issus de la pêche à la ligne ou au casier, ou encore pratiquée par des bateaux de taille petite ou moyenne (moins de 25 mètres). *(Lire aussi p. 54.)*

Plus de vigilance avec le poisson cru

Les préparations de poissons sauvages marins crus (ceviche, sushis, hareng saur, anchois marinés, etc.) peuvent être contaminées par un ver de la famille des *Anisakidae* (*Anisakis* ou *Pseudoterranova*). Celui-ci se fixe lors de son ingestion aux muqueuses digestives de l'humain, entraînant une parasitose (anisakidose) à l'origine de douleurs abdominales, de vomissements, d'ulcères voire d'allergies. Les stocker pendant sept jours dans un congélateur domestique est le plus sûr moyen de tuer les parasites.

On peut aussi privilégier les poissons d'élevage, pour lesquels le risque d'infestation par les *Anisakidae* est considéré comme très faible lorsque les poissons sont nourris avec des produits non issus de la faune sauvage (7). ■

Sylvie Boistard

VANESSA GOUYOT
Diététicienne-nutritionniste à Levallois-Perret (92)

Plutôt frais que congelés

« La consommation de poissons dits bleus (gras) permet de rééquilibrer le ratio oméga 3/oméga 6 de notre alimentation, lequel est aujourd'hui de 1 pour 20 lorsqu'il devrait être de 1 pour 4. On les choisit plutôt frais car la congélation dégrade leurs acides gras. Les poissons d'élevage renferment moins de polluants mais certains sont plus gras. Un pavé de saumon peut ainsi apporter jusqu'à 20 à 25 % de lipides. *A contrario*, le saumon sauvage a une chair plus ferme mais qui renferme plus de substances toxiques. Mieux vaut alors se tourner vers celui d'Alaska où les eaux sont moins polluées. »

(1) France Agrimer, 2022.

(2) Table nutritionnelle Ciqual, Anses.

(3) Type 2 diabetes preventive effects with a 12-months sardine-enriched diet in elderly population with prediabetes : An interventional, randomized and controlled trial, Diaz-Rizzolo D.A. et al, *Clinical Nutrition*, 2021.

(4) Associations of Fish Consumption With Risk of Cardiovascular Disease and Mortality Among Individuals With or Without Vascular Disease From 58 Countries, Mohan D. et al, *Jama Internal Medicine*, 2021.

(5) Red Blood Cell DHA Is Inversely Associated with Risk of Incident Alzheimer's Disease and All-Cause Dementia : Framingham Offspring Study, Sala-Vila A. et al, *Nutrients*, 2022.

(6) Manger du poisson : pourquoi ? comment ? Anses, 2022.

(7) *Anisakis spp, Pseudoterranova spp.*, Fiche de description de danger biologique transmissible par les aliments, Anses, 2017.

CAHIER DU GRAND EST

FRANCK LEROY
PRÉSIDENT DE LA RÉGION GRAND EST

“Avec l’accélération du changement climatique, l’heure est aux solutions”

Selon Franck Leroy, une politique intégrant les risques du dérèglement climatique doit aider à préserver les habitants, l’économie, l’agriculture, la ressource en eau et la biodiversité du Grand Est.

« *L’accélération des phénomènes de dérèglement climatique, accélération qui surprend parfois même des experts est intégrée dans le nouveau Schéma régional d’aménagement, de développement durable et d’égalité des territoires (Sraddet) prévu pour le second semestre 2024* », souligne Franck Leroy. « *S’il faut évidemment s’efforcer d’abord de satisfaire le quotidien des habitants de nos territoires* », précise le Président de la Région Grand Est, « *il faut aussi réfléchir à 15 ou 20 ans et intégrer les apports de la science et les observations des experts – je pense notamment à ceux du GIEC – dans toutes nos politiques.* »

Que redoutez-vous le plus pour votre région ?

Les vagues de chaleur sont à redouter quand le GIEC indique qu’en 2050, lors des épisodes les plus intenses, la température pourrait dépasser les 50 °C et avoisiner les 55 °C. En 2003, avec 39,5 °C en France, il y a eu 18 000 morts. Imaginez 15° de plus ! Il faut regarder les choses en face. Le risque est énorme pour la population, pour tous ceux qui vivent dans des logements mal isolés mais aussi pour les productions agricoles, le monde de l’entreprise… Une possible catastrophe majeure. Le deuxième péril réside dans le manque ou dans le trop-plein d’eau. La sécheresse peut être dramatique pour une région comme la nôtre. Ainsi, en 2022, la moitié des cours d’eau étaient à sec et 80 000 personnes ont dû être approvisionnées par des citernes d’eau potable. Le trop-plein d’eau, lui aussi, peut survenir avec des phénomènes climatiques de plus en plus violents – on l’a vu récemment à Boulogne-sur-Mer où il est parfois tombé en 48 heures l’équivalent de deux mois de pluie. Ici, nous nous souvenons qu’en 2021 il y a eu des dizaines de morts de l’autre côté de la frontière, en Belgique et en Allemagne, parce que nos fleuves – je pense notamment à la Meuse – s’étaient chargés d’énormément d’eau chez nous.

Quelles sont les zones les plus vulnérables ?

Les villes, en général, sont confrontées à des îlots de chaleur qui interviennent en période de canicule. Quand le soleil tape, la chaleur est emmagasinée par les sols artificialisés, où le bitume et les pierres ont remplacé les sols naturels. Cette chaleur se libère pendant la nuit, qui ne se rafraîchit pas, et c’est alors que les personnes les plus vulnérables, les enfants en bas âge, les personnes âgées peuvent connaître des situations terribles. C’est moins vrai dans les zones rurales parce que la présence de la nature, la présence des arbres, rafraîchit l’atmosphère.

Que faire ?

Tous les maires savent qu’il va falloir renaturer nos villes, planter des arbres parce que l’évapotranspiration apportera de la fraîcheur. Qu’il va falloir disposer un peu partout d’îlots de fraîcheur où les habitants peuvent venir se reposer et retrouver du bien-être. Il faudra également cesser d’artificialiser les sols, selon la loi ZAN, la consommation de foncier devant être diminuée de moitié d’ici à 2030, et réduite à zéro en 2050.

Ce n’est pas si facile que ça à appliquer…

Oui, c’est compliqué, et nombre de nos communes, sur les 5152 que compte le Grand Est n’ont pas les moyens en interne de gérer ces questions. Pour y répondre, nous sommes en train de créer un Institut régional de formation des élus locaux, en conjonction avec les associations de maires qui devrait, selon moi, être actif dès le début 2024. Cet organisme certifié pourra être saisi par les élus qui demandent à bénéficier de telle ou telle expertise en cas de difficulté. L’heure n’est plus aux polémiques mais aux solutions.

PHOTOS : JLSTADLER/RÉGION GRAND EST - G. GARITAN / WIKIPEDIA - LLUSTRATION : FREEPIK.COM

JEAN JOUZEL
PALÉOCLIMATOLOGUE, PRIX NOBEL DE LA PAIX POUR LE GIEC

ON JOUE AVEC LE FEU MAIS IL Y A DES OPPORTUNITÉS

Alors que le 6e rapport du GIEC prévoit au niveau planétaire 250 000 morts supplémentaires par an d'ici à 2050 imputables à l'évolution du climat, en France, l'ancien vice-président du groupe d'experts intergouvernemental voit dans les régions le fer de lance de la lutte contre ce dérèglement.

Ce que je cite de plus en plus souvent, depuis quelques années, ce sont les régions qui pourraient devenir invivables ! Invivable ne signifie pas qu'on va mourir tout de suite mais qu'il devient impossible dans ces lieux, en été, de mener une activité normale. On ne peut ni travailler, ni pratiquer un sport à l'extérieur… Longtemps, on a considéré ce phénomène comme lointain. Or, que s'est-il passé en juillet dernier ? En Iran, la température a grimpé au-delà de 50 °C – 53 °C dans la ville d'Avhaz par exemple – et le gouvernement s'est vu obligé de prendre la décision de fermer les écoles, banques, bureaux et de demander à la population de rester chez elle pendant deux jours. Si la température augmente de 3° à l'échelle planétaire, certaines régions équatoriales et tropicales vont devenir invivables. On joue avec le feu, car une telle situation est source d'instabilité, à l'origine de conflits notamment pour l'accès à l'eau. En France et en Europe, la canicule de 2003 a permis une prise de conscience de la fragilité des populations. Or, comme le rappelle le 6e rapport du GIEC, il est hautement probable qu'un excès de mortalité de 250 000 personnes par an d'ici à 2050 – dont la moitié en Afrique – sera imputable au changement climatique.

Il y a dix ans, dans son 5e rapport, le GIEC détaillait déjà l'incidence de l'augmentation de température sur la santé humaine. Que ce soit avec le risque accru de maladies infectieuses, de problèmes de santé mentale, d'insécurité alimentaire *(lire aussi pages suivantes)*… Ce qu'il ne faut pas oublier de dire, c'est que la faune et la flore souffrent autant que nous, et c'est toute l'idée de « One Health », la santé globale, de rappeler qu'on ne peut pas penser à la santé des seules populations mais qu'il faut aussi prendre en compte celle de la nature. Chez nous, cela signifie d'ailleurs que l'agriculture devra s'adapter. Mais aussi que les territoires ruraux ont des opportunités à saisir. Notamment dans le domaine des énergies renouvelables, en développant par exemple l'agrivoltaïsme, la méthanisation, l'utilisation du bois… À ce propos, j'ai été frappé par le rapport publié en juin 2023 par l'Académie des sciences sur les forêts françaises. Alors qu'on met beaucoup d'espoir dans leur rôle de puits de carbone pour atteindre la neutralité carbone en 2050, attention, elles perdent de leur productivité, victimes d'incendies, de sécheresse, de maladies (la crise des scolytes). Sur toutes ces questions, mais aussi celles de mobilité, adaptation des bâtiments, urbanisme, ce sont les régions qui ont la main. Je dis souvent que le rôle de l'Etat est de fixer un cadre avec ses objectifs, de le décliner à travers la législation, mais la réalité de la lutte contre le réchauffement climatique aussi bien que l'adaptation à ce changement, ce sont les territoires qui l'accomplissent. Une transition à 70 milliards d'euros par an. ■

Propos recueillis par D. J. L.

NADÈGE HORNBECK

VICE-PRÉSIDENTE DE LA RÉGION GRAND EST, EN CHARGE DE LA SANTÉ, DE LA PRÉVENTION ET DU HANDICAP

ÉTUDE DE VULNÉRABILITÉ

3 *objectifs principaux pour la santé*

S'adapter au changement climatique est une nécessité absolue afin d'offrir un avenir viable aux générations futures. Voilà pourquoi la Région Grand Est mène une politique déterminée pour atténuer les effets du climat à travers une série de mesures, comme le programme Life Biodiv'Est, le plan sécheresse, le programme Climaction ou la démarche Lycées en Transition. Pour amplifier et compléter cette ambition régionale, l'État et la Région ont lancé en juin 2023 la démarche « Grand Est - Région Verte » et 45 mesures d'adaptation au changement climatique. Car celui-ci affecte la santé comme le fonctionnement des systèmes de santé, des mesures spécifiques ont été prises autour de 3 objectifs principaux :

1. Accompagner des établissements de soins en promouvant l'écoresponsabilité et la décarbonation des établissements de santé. Le Programme « Hôpital du Futur » vise à les accompagner dans les projets d'investissement concourant à l'adaptation au changement climatique.

2. Soutenir 50 établissements de santé volontaires en outils de détection des fuites, les accompagner sur l'équipement et l'amélioration des usages.

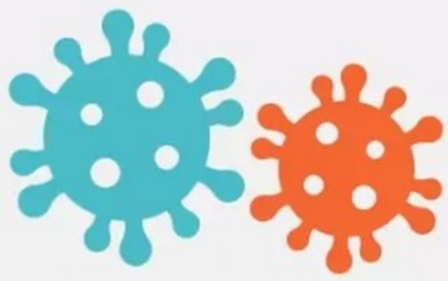
3. Apporter un soutien aux collectivités dans la mise en œuvre de projets d'Urbanisme Favorable à la Santé, en lien avec les actions du Plan Régional de Santé Environnementale 4.

L'urgence climatique nous oblige à repenser nos modes de vie actuels. L'ensemble des acteurs du Grand Est doivent adapter leurs stratégies et politiques, qu'elles soient volontaires ou réglementaires. L'enjeu environnemental et sanitaire est d'inscrire notre économie et notre société dans la responsabilisation individuelle et collective. Penser global, agir local, chacun doit y prendre sa part. ■

LES NOUVEAUX RISQUES À ANTICIPER

Hausse des températures, événements météorologiques extrêmes, pollution de l'air et de l'eau ainsi que l'insécurité qui en résulte affectent la santé et le bien-être humains, tout particulièrement des femmes et des enfants. Trois scientifiques explicitent certains des nouveaux défis de la médecine face au dérèglement climatique.

LES MALADIES INFECTIEUSES



Avec le changement climatique, de plus en plus de pathologies exotiques arrivent en Europe. Pour la France hexagonale, j'insisterai sur l'importance du moustique-tigre (*Aedes Albopictus*), espèce invasive arrivée en 2004 dans le Sud-Est et qui couvre aujourd'hui quasiment tout le pays, capable de transmettre jusqu'à 26 arbovirus – des virus qui ont besoin des insectes pour cette transmission. Il est à l'origine de cas autochtones de dengue, dont certains en région parisienne en 2023, ce qui est inhabituel puisque l'essentiel des cas se signalaient jusqu'à présent sur le pourtour méditerranéen. Il y a aussi eu, par le passé, de premiers cas de chikungunya en 2010 et de Zika en 2019. Parallèlement, un autre moustique (*Culex Pipiens*) est à l'origine de la transmission à l'Homme de deux autres virus, West Nile et usutu, qui affectent essentiellement les oiseaux. À noter le partage des tâches entre les *Aedes* et les *Culex*, les premiers piquant pendant la journée et les seconds essentiellement la nuit. Il est très important de regarder ce qui se passe ailleurs dans le monde car d'autres virus, profitant des déplacements des humains, peuvent arriver sur le territoire depuis les zones confrontées toute l'année aux moustiques. Pour l'instant, dans l'Hexagone, la dengue (par exemple) se limite à la saison des moustiques, une période limitée d'environ quatre mois, autour de l'été. Il faut faire attention de ne pas être piqué pendant ces quatre mois.

Anna-Bella Failloux, responsable de l'unité Arbovirus et insectes vecteurs, Institut Pasteur. Ce texte est extrait de l'article « Ces maladies infectieuses favorisées par le réchauffement climatique ».

ARTICLE SUR LE SITE DE SCIENCES ET AVENIR : sciav.fr/923malinf

PHOTO : SDP / CONSEIL REGIONAL GRAND EST - ILLUSTRATION : FREEPIK.COM

ATTENTION SANTE MENTALE EN DANGER

Les bouleversements climatiques pourraient impacter en profondeur la santé mentale des Français. Plusieurs études ont en effet montré que des variables météorologiques comme le niveau de température, d'ensoleillement, ou d'humidité influaient sur nos états mentaux et nos comportements : lorsque la température augmente, nous avons ainsi tendance à observer plus de comportements violents, plus d'accidents de la route, mais aussi plus de tentatives de suicide et de mortalité par suicide. En psychiatrie, la variation saisonnière des symptômes de trouble de l'humeur comme la dépression et le trouble bipolaire est probablement le meilleur reflet de l'influence de ces variables sur notre santé mentale. Les pics de température et l'exposition prolongée à la lumière naturelle pendant les périodes estivales sont associés aux épisodes d'hypomanie ou de manie. Quant aux événements météorologiques extrêmes, ils provoquent des symptômes de dépression, dont l'impact est accentué pour les femmes et les sujets en situation de précarité socio-économique. Il ne faudrait pas oublier les enfants, pour qui ces événements météorologiques extrêmes balayent la sécurité du foyer, provoquent des syndromes de stress post-traumatique et des troubles de l'humeur persistant de nombreuses années après leur incidence. Certaines études estiment ainsi que 88 % des conséquences des changements climatiques toucheront les enfants.

Docteur Hugo Bottemanne, psychiatre et chercheur à l'Institut du Cerveau de Paris. Ce texte est extrait de l'article « La santé mentale au prisme des bouleversements climatiques ».

ARTICLE SUR LE SITE DE LA RECHERCHE : https://bit.ly/santeclimat

L'indispensable adaptation des bâtiments

Le secteur de la santé représente 8 % des émissions de gaz à effet de serre au niveau hexagonal, rappelle Laurie Marrauld, maîtresse de Conférences à l'École des hautes études en Santé Publique (EHESP), qui a dirigé le volet santé du Shift Project « Décarboner la santé pour soigner durablement », actualisé en avril 2023 (1). Ce qui implique, estime la région Grand Est, de diminuer ces émissions tout en améliorant le bien-être des patients et des personnels des établissements de santé (hôpitaux, crèches, Ehpad…). L'industrie du bâtiment s'implique désormais dans l'adaptation des constructions, en termes d'isolation, mais aussi pour minimiser les risques (inondations, résistance à la rétractation et au gonflement des argiles…). Il faut également revoir l'approvisionnement en énergie (électricité, pétrole, gaz) de l'ensemble des équipements, tout en suivant l'évolution du secteur numérique tant sur le plan médical (matériel médical technologique, suivi de patient, télémédecine) qu'administratif. ■

(1) https://theshiftproject.org/article/decarboner-sante-rapport-2023/

DOUBLE PEINE POUR LES FEMMES

Les normes sociales discriminatoires, à l'instar de la précarité, de l'isolement géographique, de l'insécurité alimentaire… majorent les effets négatifs déjà multiples du dérèglement climatique. Du fait de facteurs sociaux, économiques et culturels, les femmes sont particulièrement vulnérables, surtout dans les pays à revenu faible et intermédiaire. Les événements météorologiques extrêmes obligent à des déplacements dont 80%, selon l'UNESCO, concernent les femmes et les filles. Les difficultés de la société civile à maintenir la sécurité ainsi que les risques de violences faites aux femmes sont également majorés. Enfin, les femmes, souvent principales pourvoyeuses de nourriture et d'eau pour les familles, dépendent beaucoup sur le plan économique de l'agriculture, l'un des secteurs les plus touchés par la crise climatique. Quant aux conséquences sanitaires du dérèglement climatique, directes (chaleur et froid, pollutions de l'air et de l'eau…) et indirectes (maladies à transmission vectorielle…), elles sont bien identifiées : naissances prématurées et maladies maternelles augmentent lors des vagues de chaleur et en cas de températures extrêmes. La pollution de l'air, preuves épidémiologiques à l'appui, a un impact sexo-spécifique négatif sur la santé sexuelle, la fertilité, la grossesse (à nouveau naissances prématurées et petit poids de naissance) et la santé mentale maternelle. Enfin, la crise climatique met aussi en danger les droits sexuels et reproductifs des femmes (accès à la planification familiale, suivi médico-psycho-social de la femme enceinte…).

Dr Catherine Azoulay, gynécologue, Alliance Santé Planétaire.

THE GREEN COLLECTION - ARDON BAR-HAMA

Ce fragment de quelques centimètres (vu ici recto-verso) est l'un des derniers textes décryptés parmi les centaines de milliers de papyrus trouvés sur le site égyptien d'Oxyrhynque et peu à peu analysés. Il relate en grec des épisodes de la vie du Christ.

L'évangile oublié qui bouleverse la Bible

Découvert en 1897 sur le site d'Oxyrhynque, en Égypte, un minuscule fragment de papyrus récemment analysé secoue le milieu de l'historiographie biblique. Daté de la première moitié du IIe siècle, cet extrait apocryphe pourrait être le plus ancien fragment d'évangile. De quoi remettre en cause le corpus canonique établi par l'Église en 1546.

Par Marine Benoit

La découverte est colossale. Une *« petite bombe »*, nous dit Michael Langlois, historien et philologue spécialiste des manuscrits bibliques à l'université de Strasbourg. *« Prête à exploser mais qui pour l'instant reste bien cachée dans un imposant volume scientifique paru le 31 août dernier,* The Oxyrhynchus Papyri, *volume LXXXVII. »* Cette bombe semble pourtant bien inoffensive de prime abord : elle est faite de papyrus et ne mesure qu'une dizaine de centimètres de haut sur à peine quelques centimètres de large. Depuis sa découverte en 1897 par des archéologues britanniques sur le site d'Oxyrhynque, à 180 kilomètres du Caire (Égypte), parmi des centaines de milliers de papyrus enfouis *(lire l'encadré p. 80)*, le petit fragment qui porte la cote 87.5575 attendait d'être étudié dans les réserves de l'université d'Oxford (Royaume-Uni). Voilà chose faite.

À sa surface, des caractères grecs relatent un épisode de la vie du Christ, celui du Sermon sur la montagne. Dans l'Évangile de Matthieu, il est détaillé au chapitre 6, tandis que dans celui de Luc, il se place au chapitre 12. Jésus y somme ses disciples de ne pas s'inquiéter de ce qu'ils mangeront et boiront pour survivre puisque les oiseaux, qui ne cultivent pas la terre, trouvent toujours de quoi se nourrir grâce à Dieu : *« Regardez les oiseaux du ciel : ils ne sèment ni ne moissonnent, ils n'amassent rien dans des greniers, et votre Père céleste les nourrit. Ne valez-*

ARCHÉOLOGIE

Oxyrhynque, une ancienne décharge devenue une mine d'or pour les papyrologues

En 1897, alors qu'ils fouillent un site antique égyptien considéré comme mineur — Oxyrhynque, ancienne bourgade grecque située à quelque 180 km au sud du Caire —, deux jeunes archéologues britanniques du Queen's College d'Oxford tombent sur un inestimable trésor archéologique : un amoncellement vertigineux de morceaux de papyrus entassés sur une dizaine de mètres de hauteur. Bernard Pyne Grenfell et Arthur Surridge exhument plus d'un demi-million de fragments de textes rédigés principalement en grec et en latin, même si certains figurent en hiéroglyphes, en copte ou encore en hiératique. Parmi eux, des documents datés pour la plupart du IIIe au VIIe siècle après J.-C., aussi divers que des contrats, des listes d'achats, des registres administratifs, des correspondances, des traités scientifiques, des poésies, des satires, des œuvres perdues de comédie ou de tragédie grecques ou encore des extraits de la littérature chrétienne primitive. Comment autant de documents antiques ont-ils pu se retrouver dans ce « trou » ? Il s'agirait tout simplement d'une poubelle destinée à des papyrus maintes fois réutilisés et trop usés ou à des chutes de « papier » ayant servi à emballer des momies de l'époque ptolémaïque. L'étude de ces précieux manuscrits n'est en tout cas pas près de s'achever tant les fragments sont nombreux. Le dernier volume des *Oxyrhynchus Papyri* consacré exclusivement à leur analyse, celui-là même dans lequel figure le travail sur le papyrus 5575, porte le numéro 87. Plus parlant encore, le premier tome de cette série d'ouvrages est paru en… 1898 !

COURTESY OF THE EGYPT EXPLORATION SOCIETY

Fragments de papyrus collectés durant les fouilles du site égyptien.

vous pas beaucoup plus qu'eux ? », dit le Christ. En somme, la transcription de l'épisode peut sembler anecdotique. Mais deux particularités rendent détonante cette bribe de texte. Sa version du Sermon sur la montagne, d'abord, ne correspond à aucune autre relatée dans les deux Évangiles cités plus haut, qui comptent parmi les quatre évangiles présents dans la Bible (Matthieu, Marc, Luc et Jean). Et pour cause : à la ligne 11, pour parler des « oiseaux », le fragment 5575 emploie le mot « *ornea* ». Chez Luc, le mot utilisé est « *korakas* » tandis que chez Matthieu, il s'agit de « *peteina* ». Une différence minime, puisqu'il s'agit là de synonymes du mot « oiseaux », mais une différence quand même.

Ce n'est pas tout. Vient ensuite une parole correspondant à la sentence 27 (ou 32 selon les versions) de l'Évangile de Thomas, un évangile dit apocryphe, soit un récit de la vie du Christ qui n'a pas été retenu pour faire partie des livres de la Bible des chrétiens *(lire p. 82)* : « *Jésus dit : "Si vous ne jeûnez pas au monde, vous ne trouverez pas le royaume de Dieu ; si vous n'observez pas le sabbat comme un sabbat, vous ne verrez pas le Père."* » Là encore, rien de fracassant en apparence. « *Il y a pourtant de quoi s'enthousiasmer* », assure Michael Langlois. « *Il s'agit de la première occurrence connue d'un entrelacement d'éléments similaires à ceux de Luc et de Matthieu et d'éléments semblables à ceux de l'Évangile de Thomas, qui ne sont par ailleurs connus que de ce dernier. En cela, le 5575 est unique parmi tous les papyrus connus.* »

Autre singularité, et non des moindres : la datation du fragment. Son analyse paléographique — c'est-à-dire de la forme de ses caractères — a permis de situer sa rédaction au IIe siècle, voire à la fin du Ier siècle. Soit à peine une centaine d'années après que les événements qu'ils relatent auraient eu lieu. « *Ce qui en fait tout simplement l'un*

VEIKKO-SOMERPURO

« Il s'agit de l'un des plus anciens morceaux d'évangile — peut-être même le plus ancien — découvert à ce jour »

Michael Langlois, historien et philologue spécialiste des manuscrits bibliques à l'université de Strasbourg

Enfouis dans des monticules de détritus, un demi-million de fragments de papyrus ont été découverts dans l'ancienne ville d'Oxyrhynque, au sud du Caire, lors de fouilles menées de 1896 à 1907.

COURTESY OF THE EGYPT EXPLORATION SOCIETY

des plus anciens morceaux d'évangile — peut-être même le plus ancien — découvert à ce jour, ex aequo *avec un autre papyrus du même âge nommé P52* », s'enthousiasme Michael Langlois. Mais P52, lui, n'est pas un extrait d'évangile apocryphe, puisqu'il contient deux passages fidèles à l'Évangile de Jean. Le record que détient le nouveau fragment d'Oxyrhynque est donc double, puisqu'il est aussi le plus vieil évangile apocryphe jamais trouvé. « *Bien sûr, la paléographie comparative présente ses limites* », nuance le chercheur. Celle-ci repose sur une comparaison des mains des scribes, débouchant ainsi sur des degrés de probabilité plutôt que sur des certitudes. « *Mais le 5575 présente d'étroites similitudes avec un autre papyrus d'Oxyrhynque, le 4009, qui pourrait avoir été copié par le même scribe à la même époque, ce qui augmente la probabilité de la période suggérée.* »

Des évangiles apocryphes aussi anciens que les canoniques

Ce que signifie cette découverte est immense : elle pourrait être une preuve concrète que les évangiles apocryphes sont aussi anciens que les évangiles canoniques, et qu'il n'y a donc pas de raison archéologique de considérer les seconds comme plus crédibles que les premiers. « *On dit souvent que les traditions apocryphes sont tardives et qu'elles sont des inventions largement postérieures à Jésus,* affirme Michael Langlois. *Avec ce fragment, on est en mesure de démontrer* **Suite page 84**

MÉTHODE

Comment obtenir une datation certaine

Parce qu'une analyse paléographique est toujours réfutable, la question d'une datation au carbone 14 (C14) — méthode qui consisterait à prélever un échantillon du papyrus pour mesurer le rapport entre ses quantités de carbone 12 et 14 et estimer chimiquement son âge — se pose forcément chez les chercheurs. Pour l'archéologue Michael Langlois, *« cette étape est vraiment souhaitable »*. Mike Holmes, lui, est plus frileux : *« Le fragment est si petit que l'on ne pourrait en prélever un morceau sans le détériorer complètement. »* Autre problématique : des résultats exploitables ne sont pas garantis. En effet, la courbe de désintégration atmosphérique du C14 utilisée actuellement diminue régulièrement jusqu'à environ 250 après J.-C. Après cette date, elle augmente à nouveau pendant une cinquantaine d'années puis reprend son déclin. Ainsi, deux fourchettes de dates différentes pourraient en ressortir.

YVAN TRAVERT / AKG IMAGES

Représentation de la Nativité (détail du plafond de l'église Saint-Martin de Zillis, en Suisse, peint au XII^e^ siècle).

RÉCITS

Ce que nous disent les évangiles apocryphes

Rédigés entre les II^e^ et VI^e^ siècles, les textes apocryphes chrétiens forment une vaste littérature qualifiée par les biblistes de « *marginale* » — au sens de « rédigée dans les marges ». Très hétérogène, elle comprend tant des écrits théologiques, certains ésotériques, que des lettres, des traités ou encore des récits, parmi lesquels les fameux « évangiles », textes attribués à des hommes et des femmes qui auraient fréquenté le Christ et décidé de coucher sur papyrus, en grec, leur témoignage. Aujourd'hui, l'Église justifie entre autres leur éviction par leur datation : ils auraient été rédigés après les évangiles canoniques de Marc, Matthieu, Luc et Jean.
Un argument que le fragment 5575 pourrait venir contrer. Bien entendu, rien ne permet de penser que les figures auxquelles ils sont attribués, apôtres ou disciples de Jésus, ont réellement écrit ces lignes. Ils seraient plutôt l'œuvre de scribes anonymes, sans doute issus de communautés religieuses locales ayant voué un culte particulier à l'un plus qu'à un autre de ces personnages. Bien qu'ils aient été définitivement mis l'écart par l'Église lors du concile de Trente, en 1546, les évangiles apocryphes sont gorgés d'éléments qui ne figurent pas dans les évangiles canoniques et qui n'ont cessé de nourrir, à travers les siècles, les représentations artistiques de la chrétienté.

L'enfance de Marie et la naissance de Jésus

L'enfance de Marie, mère du Christ, et la façon dont elle mit au monde ce dernier sont des thèmes abordés dans plusieurs évangiles apocryphes. Mais c'est sans doute le Protévangile de Jacques (qui désigne ici le fils de Joseph né d'un premier mariage et donc demi-frère de Jésus), dont on estime la rédaction à la seconde moitié du II^e^ siècle, qui connut le plus de fortune. On y apprend notamment que les parents de Marie se prénommaient Anne et Joachim ; qu'elle fut élevée au Temple dès son plus jeune âge en vue de son futur destin ; que Joseph, à qui elle fut promise alors qu'elle sortait à peine de l'adolescence, était un homme veuf et très âgé (un détail ignoré des évangiles canoniques), ou encore qu'elle tomba enceinte sans perdre sa virginité. C'est également au Protévangile de Jacques que l'on doit les représentations de la Nativité dans une grotte. « *Dans ce texte, le merveilleux a pris le pas,* explique le père Gérard Billon, bibliste enseignant à l'Institut catholique

de Paris. *Ce qui explique sans doute l'immense influence qu'il a eue et a encore dans le monde chrétien.* »

Les jeunes années du Christ

Les évangiles canoniques n'évoquent que très succinctement l'enfance et la jeunesse de Jésus. Après sa présentation au Temple à l'âge d'un mois environ, le bambin et l'adolescent passent totalement dans l'ombre, excepté à une occasion, lorsque, à 12 ans, il échappe à la vigilance de ses parents pour aller discuter avec des docteurs (uniquement chez Luc 2,40-52). Aussi appelle-t-on la vie du Christ avant ses 30 ans, âge où il devient prédicateur, les « *années perdues* » ou la « *vie cachée de Jésus* ». Un évangile apocryphe se propose de combler ce manque : l'Évangile du Pseudo-Thomas (un philosophe israélite), dans lequel on voit l'enfant grandir et, progressivement, multiplier les miracles. « *L'Antiquité est une période où l'on invente des récits mirifiques pour tenter de répondre à des questions philosophiques et théologiques complexes. Le Protévangile de Jacques est l'un d'eux,* explique Gérard Billon. *À travers de nombreuses anecdotes, il tente d'apporter des explications concrètes à la nature même du Christ, à la fois vrai homme et vrai Dieu, une identité difficile à assimiler.* »

Le rapport privilégié du Christ avec Marie-Madeleine

Marie de Magdala, dite Marie-Madeleine, est une figure qui n'a cessé de fasciner à travers les siècles. Pourtant, les évangiles canoniques ne sont pas bavards à son sujet. On y apprend seulement qu'elle est une femme guérie par Jésus, qu'elle devient sa disciple et

L'Église justifie leur éviction par leur datation. Un argument que le fragment 5575 pourrait venir contrer

qu'elle est le premier témoin de sa résurrection. Les auteurs gnostiques, qui l'apprécient tout particulièrement, se chargeront ainsi de lui donner plus de consistance. Dans l'Évangile dit de Marie (qui désigne donc ici Marie-Madeleine), sa proximité avec Jésus est largement soulignée. « *Ce texte nous dit qu'elle comprend mieux que n'importe quel autre apôtre ses paroles les plus secrètes* », développe Gérard Billon. L'Évangile selon Philippe, lui, la présente comme « *la compagne du Seigneur* », celle qu'il « *aimait plus que les autres disciples* » et qu'il « *embrassait souvent sur la bouche* ». « *Ces évangiles firent fantasmer Dan Brown, l'auteur du célèbre* Da Vinci Code. *Mais même dans ces textes apocryphes, la relation intime entre Jésus et Marie-Madeleine reste spirituelle. Elle n'a rien de charnel* », précise Gérard Billon.

AKG IMAGES

« L'apparition à Marie-Madeleine », extrait d'un livre d'heures du XIII^e siècle.

La Passion et la Résurrection

Le thème de la Passion du Christ — l'ensemble des événements qui ont précédé et sont survenus à la mort du Jésus — est largement couvert par les Évangiles du Nouveau Testament. Mais, là encore, certains apocryphes apportent leur lot de détails supplémentaires. C'est le cas des Actes de Pilate, datés du IV^e siècle, qui s'attardent, par exemple, sur un épisode mentionné brièvement dans l'Évangile de Matthieu : celui impliquant Claudia Procula, la femme de Ponce Pilate, qui, après avoir fait un étrange songe, serait intervenue auprès de son mari pour tenter de sauver Jésus. « *L'ensemble des Actes va là encore insister sur le caractère surnaturel du Christ, notamment lorsqu'il nous dit que les aigles des porte-enseignes romains s'inclinent sur son passage pour montrer qu'il est bien Dieu.* » L'Évangile de Pierre, autre récit apocryphe dont on estime la rédaction à la première moitié du II^e siècle, est de son côté une variation libre de la Passion centrée sur l'apôtre Pierre. « *La Résurrection de Jésus s'y fait de manière extrêmement spectaculaire, là où les évangiles canoniques sont d'une discrétion absolue* », détaille Gérard Billon. Il y est en effet raconté que Jésus sort de son tombeau sous la forme d'un géant dont la tête touche les nuages, accompagné de deux anges titanesques et de sa croix qui, dotée de parole, clame qu'il est le Christ. **M. B.**

SAUL LOEB / AFP

Ouvert en 2017, l'établissement privé avait acheté le fameux fragment 5575, volé dans les réserves de l'université d'Oxford et restitué depuis à son propriétaire.

COLLECTIONS

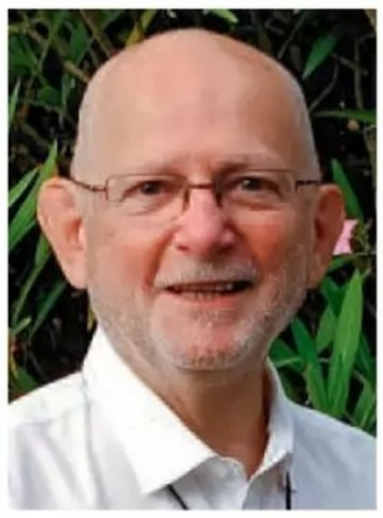
Le sulfureux musée de la Bible de Washington

Depuis son inauguration à Washington (États-Unis) il y a six ans, le musée de la Bible, établissement privé principalement financé par le milliardaire Steve Green, fondateur et propriétaire de la chaîne de grands magasins Hobby Lobby (spécialisés dans les loisirs créatifs), n'a cessé d'enchaîner les déboires. Dès 2017, année de son ouverture, la justice lui reproche d'avoir acheté en 2010, dans le but de remplir ses vitrines, plus de 5500 antiquités volées à l'Irak à la faveur de l'occupation américaine. En 2019, l'archéologue français Michael Langlois a de son côté des soupçons sur la provenance et l'authenticité de la pièce phare du musée : un ensemble de fragments de manuscrits de la mer Morte (les morceaux les plus anciens de la Bible hébraïque) achetés entre 2009 et 2014 pour plusieurs millions de dollars. Le verdict tombe un an plus tard : il s'agit de contrefaçons. Jamais deux sans trois. Toujours en 2019, un autre scandale explose. Il concerne cette fois 11 fragments de papyrus en grec — dont le fameux 5575 —, achetés entre 2013 et 2014 par Hobby Lobby à un universitaire d'Oxford, le papyrologue Dirk Obbink. À l'époque, ce dernier prétend que ces fragments lui appartiennent, sans donner plus de détails. Steve Green n'est décidément pas très regardant : après une enquête de la Société d'exploration de l'Égypte (EES), propriétaire des papyrus d'Oxyrhynque regroupés sous le nom de « collection OxyPap », il apparaît que les fragments achetés par Hobby Lobby ont été volés par Dirk Obbink dans les réserves d'Oxford. Le musée finira par les restituer quelques mois plus tard à l'EES. Le procès de Dirk Obbink, lui, est toujours en cours.

Suite de la page 81 *le contraire… et, bien sûr, on est tenté d'extrapoler.* » La question se doit en effet d'être soulevée : pourquoi ne pourrait-on pas accorder autant d'importance à l'évangile apocryphe selon Marie — non pas la Vierge, mais la disciple du Christ Marie-Madeleine *(lire p. 83)* —, dont on dispose de fragments datés du IIIe siècle et on estime la rédaction au IIe siècle, qu'à celle de Matthieu ou de Luc ?

Un long processus de sélection des textes canoniques

De nombreux textes apocryphes — du grec « *apokryphon* », « caché » — ont été découverts dans les sables du désert égyptien aux XIXe et XXe siècles. Dans la région du Fayoum, ce sont des œuvres anonymes gnostiques qui ont été mises au jour, autrement dit des textes d'un courant religieux qui s'est illustré dans l'Empire romain entre le IIe et le IIIe siècle et qui répondent à des questions foncièrement philosophiques. Dès le IVe siècle, ils furent qualifiés d'hérétiques par les Pères fondateurs de l'Église, ces auteurs ecclésiastiques de la fin du Ier siècle au VIIIe siècle, le plus souvent des évêques, dont les écrits et les actes ont en partie défini la théologie chrétienne. Dans l'oasis de Dakhla, ou de Médinet Mâdi, au sud-ouest de la région, ont été trouvés des écrits manichéens (du nom d'une doctrine apparue au IIIe siècle opposant un royaume de lumière à un monde de ténèbres). Mais le plus grand corpus de manuscrits apocryphes, dont un exemplaire complet de l'Évangile selon Thomas, a été découvert en 1945 près de Nag Hammadi, à 80 kilomètres au nord-ouest de Louxor, par des paysans venus récolter de l'engrais dans une grotte. Dans une jarre scellée reposaient pas moins de 13 codex (des ensembles de pages manuscrites cousues et reliées) protégés par des étuis de cuir et rédigés en langue copte. Étudiés dès 1954, ces fabuleux manuscrits du IVe siècle entrent, eux, dans la catégorie des évangiles, soit des récits attribués aux disciples de Jésus.


GÉRARD BILLON

3 QUESTIONS À

GÉRARD BILLON

PRÊTRE, ENSEIGNANT À L'INSTITUT CATHOLIQUE DE PARIS ET PRÉSIDENT DE L'ALLIANCE BIBLIQUE FRANÇAISE

Une source commune avec les Évangiles de Luc et de Matthieu?

Quelle place accordez-vous aux textes apocryphes?
Ils sont loin d'être dénués d'intérêt et témoignent souvent avec brio de la vitalité d'une littérature qui s'est développée autour des évangiles dits de référence. Du point de vue des idées qu'ils véhiculent, certains sont parfaitement acceptables tandis que d'autres sont plus discutables.

Que vous inspire ce nouveau fragment issu du corpus d'Oxyrhynque?
Il y a dans les Évangiles de Luc et de Matthieu une proximité qui nous laisse penser qu'ils ont pu utiliser une source commune, une compilation de paroles de Jésus. Cette source dont nous n'avons malheureusement aucune trace est surnommée « source Q » par les spécialistes. Or, au vu de sa datation, ce petit fragment pourrait nous laisser entendre la même chose: cette fameuse « source Q » aurait également été connue de son auteur.

Quel serait l'impact du fragment 5575 s'il venait à prouver que des textes apocryphes sont aussi anciens, voire plus anciens, que les évangiles canoniques?
Le fragment ne ferait que confirmer ce dont l'on se doute: dans le courant du Ier siècle circulaient déjà dans les communautés chrétiennes des propos attribués à Jésus ou des interprétations de ses actes. En somme, des choses ont commencé à être écrites sur lui avant la rédaction des évangiles canoniques. Cela ne change rien au fait que ces derniers sont nos textes de référence et que les apocryphes restent des variations dans les marges. ■

Propos recueillis par M. B.

Jean-Daniel Dubois, historien des religions et spécialiste des courants gnostiques des premiers siècles à l'École pratique des hautes études, admet lui aussi que si la datation du petit fragment 5575 venait à être confirmée, cela aurait un impact majeur sur notre compréhension des tout premiers textes chrétiens. *« Il faut considérer qu'il y a toute une littérature chrétienne primitive qui circule au même moment que les textes qui ont été choisis pour faire partie de la liste des textes canoniques qui forment la Bible. C'est un fait. »* Ce choix d'exclure tout un pan de textes du Nouveau Testament tel que nous le connaissons est en réalité le résultat d'un processus en plusieurs temps. Dès la fin du IIe siècle, Irénée de Lyon, qui compte au nombre des Pères de l'Église, cite 21 livres sur les 27 qui ensemble forment le Nouveau Testament. *« Dès l'an 180, les sources nous indiquent que cet évêque précoce semble même avoir une Bible pratiquement complète [Ancien et Nouveau testament] »*, précise Jean-Daniel Dubois. Il faut néanmoins attendre le concile de Rome en l'an 382, tenu par le pape Damase Ier, pour trouver l'ancêtre du canon catholique. Sont ainsi jugés inauthentiques des textes déjà connus à l'époque, à l'instar des évangiles de Thomas, André, Pierre, Jacques, Paul ou Marie, ou encore des Actes de Pilate. Origène, théologien et commentateur célèbre de la Bible à Alexandrie au IIIe siècle, dit de ces textes: *« Nous n'ignorons pas que beaucoup de ces écritures secrètes ont été composées par des impies, de ceux qui font le plus haut sonner leur iniquité, et que les hérétiques font grand usage de ces fictions. »*

Accéder à la diversité des mondes chrétiens

Pour autant, leur lecture est encore tolérée durant les premiers siècles de notre ère. Après le concile de Trente, en 1546, date à laquelle le canon biblique est fixé, ils seront véritablement bannis par l'Église. *« C'est pourquoi historiquement, lorsqu'il s'agissait d'étudier le christianisme ancien, on travaillait surtout sur les textes brandis par ces premiers grands évêques. Mais on a compris que les manuscrits apocryphes nous permettaient d'accéder réellement à la diversité des mondes chrétiens. Les lire revient à passer d'une vision du début de l'histoire du christianisme en noir et blanc à une vision en couleurs »*, estime Jean-Daniel Dubois.
Malgré les nombreux points d'interrogation qui planent encore au-dessus de lui, le fragment 5575 d'Oxyrhynque n'en reste pas moins une preuve archéologique rare de l'existence des écritures sacrées dès les premières décennies suivant la vie du Christ. *« Il faut surtout garder en tête que les croyants de l'époque ne mettaient pas d'étiquettes sur ces textes issus de traditions orales,* conclut Michael Langlois. *Il n'y en avait pas de plus ou de moins crédible qu'un autre. Tous avaient leur place, leur raison d'être. »* ■

Dans la tête de Marion Montaigne

Après la « combi » de Thomas Pesquet, la bédéaste nous emmène côtoyer les dinosaures et les fantasques pionniers de la paléontologie. Elle se livre aussi sur sa propre expérience de dessinatrice de BD scientifiques et de grande curieuse.

Avez-vous déjà vu le film *Le Monde perdu : Jurassic Park* ? Marion Montaigne, oui, et pas qu'une fois. Ni même deux ou trois. Elle l'aurait visionné plus de 400 fois selon la légende, ou plutôt son nouvel album *Nos mondes perdus*, dans lequel s'entremêlent la genèse d'une discipline — la paléontologie — et la naissance de sa propre destinée de dessinatrice de BD scientifiques. Premier réflexe : on se méfie. Puis on rit : on n'est pas sans savoir que l'intéressée adore manier, dans ses planches, l'art de l'exagération comique. Ce sens de l'hyperbole loufoque, de l'exubérance absurde, constitue d'ailleurs l'un des ingrédients principaux de son succès, celui qui lui a valu de recevoir, par exemple, deux fois le prix du public au prestigieux festival de la BD d'Angoulême (en 2013 et en 2018). Il est loin d'être le seul.

De quoi est faite la méthode Montaigne ? Pour le savoir, lire *Nos mondes perdus*, dans lequel, pour la première fois, la dessinatrice dépasse sa pudeur naturelle et se livre sur son parcours personnel, est particulièrement instructif. On peut aussi poser la question à la bédéaste elle-même. Quand elle se met à parler, elle ressemble un peu à son dessin : vif, percutant, brouillon aussi. On a parfois l'impression que ça part dans tous les sens, que la fin de ses phrases va se perdre dans les méandres de son cerveau qui mouline et qui est déjà en train de rebondir sur la prochaine idée, et dans le volume de sa voix tantôt vive et enjouée, tantôt hésitante et presque intimidée. Puis, alors qu'on pense que le chaos et l'entropie l'ont emporté, surgit une blague bien sentie et on retombe sur nos pieds. « *Contrairement à vous, journalistes, je suis libre de choisir ce dont je parle,* commence-t-elle par expliquer. *Là où vous êtes obligés de traiter l'actualité et, par exemple, de vous coltiner un sujet sur les ondes gravitationnelles, moi je peux dire non. C'est une grande chance.* »

JOEL SAGET/ AFP

BIO EXPRESS

- **1980** Naissance à Saint-Denis, à La Réunion.
- **2008** Création du blog « Tu mourras moins bête ».
- **2011** Parution du premier album de *Tu mourras moins bête : La science, c'est pas du cinéma* (Ankama).
- **2013** Prix du public au festival de BD d'Angoulême pour le tome 2 de *Tu mourras moins bête : Quoi de neuf, docteur Moustache ?* (Ankama, 2012).
- **2018** Nouveau prix du public au festival d'Angoulême, cette fois pour l'album *Dans la combi de Thomas Pesquet* (Dargaud, 2017).
- **2023** Parution de *Nos mondes perdus*, Dargaud, 208 p., 24,50 €

Une modestie qui rejaillit dans tout ce qu'elle fait

Marion Montaigne se risque quand même, de temps à autre, à vulgariser des événements scientifiques majeurs. Non sans y mettre mille précautions. En préambule de son billet sur la découverte du boson de Higgs, cette particule qui donne sa masse à toutes les autres, on pouvait ainsi lire : « *Les experts pardonneront les approximations. Accessoirement, ils pourront me casser la gueule au festival d'Angoulême.* » Humour, toujours. Humilité, aussi. Cette modestie rejaillit dans tout ce que dit et fait la dessinatrice. Comme elle le raconte dans son nouvel album, c'est cette attitude qui l'a fait se

Dans les premières pages de l'album « Nos mondes perdus », Marion Montaigne met en scène une projection de « Jurassic Park », un film qu'elle a visionné pour la première fois à l'âge de 13 ans et qui l'a beaucoup questionnée sur la paléontologie.

tenir à l'écart des études scientifiques, elle qui, en grande amoureuse de la biologie, s'imaginait pourtant éthologue, et aimait à dessiner la série médicale *Urgences* en version vétérinaire.

De fait, Marion Montaigne n'éprouve aucun complexe à admettre qu'elle ne comprend pas. De là sont nés deux réflexes, auxquels elle fait appel quand elle se lance sur un nouveau sujet. Le premier : se documenter. Beaucoup. Énormément. Jusqu'à l'overdose. Lorsqu'elle a commencé à réfléchir à *Nos mondes perdus*, au sortir de la pandémie de Covid-19, elle a ainsi passé beaucoup de temps à lire, à compulser des planches naturalistes, à admirer des fossiles… « *Plus je me documentais et plus j'accumulais d'informations sur les débuts de la paléontologie et les dinosaures, plus je me disais qu'il fallait remonter encore plus loin, aux débuts des sciences naturelles, et même aux origines de l'humanité !* », explique-t-elle. Une curiosité débordante — en partie alimentée par les questions incessantes que se pose cette « *grosse anxieuse de la vie* » — qui implique ensuite un vaste travail de tri. « *C'est le plus dur pour moi, parce que j'ai envie de raconter tout ce que je lis ! Mais on est obligé de faire des raccourcis…* », regrette-t-elle. Le juge de paix ? Les anecdotes, les personnalités « *excentriques, un peu fofolles, qui sont intéressantes à dessiner et à raconter en tant que telles* », et aussi des choix personnels.

Lorsqu'elle se lance sur un sujet, elle a deux réflexes. Le premier : se documenter. Beaucoup, jusqu'à l'overdose. Le second : prendre conseil auprès de spécialistes

En tournant les pages de l'album, on y croise ainsi le naturaliste Georges Cuvier

(1769-1832), la *« grosse brute en anatomie »*; William Buckland, premier paléontologue à avoir nommé un fossile de dinosaure (*Megalosaurus)* en 1824 et qui, accessoirement, possédait un ours qu'il déguisait en étudiant ; ou encore Edward Drinker Cope et Othniel Charles Marsh, deux paléontologues américains prolifiques, qui, dans les années 1870, passaient leur temps à se faire des coups bas *(lire l'encadré ci-dessous)*.

Deux femmes figurent aussi en bonne place dans la galerie de personnages de la BD : Mary Anning et Mary Mantell, *« deux pionnières brillantes de la paléontologie au XIXe siècle, qui sont tombées dans l'oubli car la place des femmes, à l'époque, n'était pas dans les labos,* relate Marion Montaigne. *Je tenais à en parler car leur parcours fait écho à mon histoire personnelle, au sentiment que j'ai pu éprouver, plus jeune, que les études scientifiques étaient réservées aux tronches (sic).* »

Et puis il y a les paléo-illustrateurs : Henry de la Beche (1796-1855) et ses reptiles marins qui *« se bouffaient joyeusement »* entre eux ; Charles Knight (1874-1953), qui fut le premier à dessiner un *T. rex* ; ou encore Robert Bakker et ses dinosaures testostéronés. Leur rôle, dans une discipline où l'on raisonne la plupart du temps à partir de bouts d'os et où le dessin est souvent le seul moyen de reconstituer des dinosaures en entier, est crucial. *« C'est grâce à leur travail que se construit l'imaginaire des gens concernant ces animaux,* confirme, admirative, Marion Montaigne. *Et puis, les interrogations qu'ils peuvent avoir, sur la forme et l'emplacement des yeux ou des narines, sur la posture et la marche, etc., ça me parle : ça renvoie à des questions que je peux me poser quand je crée des personnages.* »

> « Elle a ce côté brillant et en même temps pas sûr de soi qu'ont beaucoup de scientifiques »
> **Nicolas Vabret,** immunologiste à l'École de médecine Icahn du Mont Sinaï, à New York (États-Unis)

L'autre réflexe de Marion Montaigne lorsqu'elle planche sur une bande dessinée, c'est de prendre conseil auprès d'un ou de plusieurs spécialistes. En l'occurrence, elle a beaucoup échangé avec Ronan Allain, maître de conférences au Muséum national d'histoire naturelle, à Paris, et spécialiste des dinosaures. Une rencontre qui a parfois donné lieu à des moments insolites : *« Il a par exemple accepté de regarder avec moi, en accéléré,* Jurassic World : Le Monde d'après », s'amuse-t-elle. Mais une rencontre minutieusement préparée : *« Marion est quelqu'un de très travailleur,* décrit Ronan Allain. *Quand elle est venue me voir au Muséum — nous avons passé deux demi-journées ensemble, en plus de beaucoup échanger par mails —, on sentait qu'elle avait déjà bien travaillé son sujet, car ses questions — une liste impressionnante — étaient vraiment très précises. Ça concernait principalement la chronologie des événements, la véracité de telle ou telle anecdote, etc.* »

Une chercheuse en puissance, Marion Montaigne ? *« Explorer tout ce qui a été fait et pas fait sur un sujet, c'est un réflexe très scientifique »*, acquiesce le paléontologue. *« Comme un chercheur, elle est très rigoureuse dans sa manière de se documenter et dans ce qu'elle publie,* renchérit Nicolas Vabret, immunologiste à l'École de médecine Icahn du Mont Sinaï, à New York (États-Unis), qui a aidé la dessinatrice sur plusieurs notes de blog, notamment celles concernant le Covid-19 pendant la pandémie. *Et puis elle a aussi ce côté brillant et en même temps pas sûr de soi qu'ont beaucoup de scientifiques. » « Je n'ai jamais été 100 % scientifique, je suis plutôt 12 % littéraire, 20 % sport, 20 % science, etc. : vraiment moyenne en tout,* conclut de son côté l'intéressée. *En fait, j'aime bien l'idée d'être plurielle, d'avoir le cul (sic) entre deux chaises !* » ■ **Vincent Glavieux**

RIVALITÉ

La « guerre des os » a bien eu lieu

Dans la galerie de personnages fantasques et fantastiques qui peuplent les pages de *Nos Mondes perdus*, Edward Drinker Cope (1840-1897) et Othniel Charles Marsh (1831-1899) se distinguent en illustrant, jusqu'à la caricature, les dérives que peut entraîner la compétition scientifique. Au palmarès de ces deux paléontologues américains ? D'abord, des découvertes prolifiques : leurs efforts et ceux de leurs équipes ont permis la mise au jour et l'identification de plus de 1500 espèces animales fossiles, parmi lesquelles les emblématiques tricératops et diplodocus. Mais à quel prix ! Faisant fi de toute déontologie, leur rivalité a donné lieu à une multitude de coups bas : vols, sabotages, espionnage, etc. Leur précipitation à être le premier à publier sur des espèces qu'ils pensaient nouvelles, les a conduits à les nommer souvent de façon impropre : une étude publiée en 2010 dans le *Journal of Vertebrate Paleontology* estime que seulement 36 % des noms de dinosaures donnés par Marsh restent scientifiquement valides. La statistique est encore plus terrible pour Cope : 14 % !

DU 13 AU 25 SEPT. 2024

IMMERSION DANS LE GRAND NORD CANADIEN

EXPÉDITION GROENLAND - TERRE DE BAFFIN LABRADOR - TERRE NEUVE

AMIS DU GRAND NORD, que les seuls noms de Groenland, Nunavut, Saint-Pierre et Miquelon fascinent, ce voyage est pour vous !

Bien sûr, il faudra vous armer de quelque patience et pratiquer un habile exercice mémotechnique pour retenir ceux de Kangerlussuaq, Qikiqtarjuak ou encore Nachvaq, escales parmi la douzaine que nous découvrirons lors des 13 jours d'expédition entre la grande île européenne et le Canada puis la France du bout du monde... Une occasion exceptionnelle de franchir le cercle Arctique, jouir de la beauté de paysages uniques, clarté des eaux, scintillement du glacier d'un fjord proche du parc national d'Auyuittuq.

Nous aurons la chance d'être en compagnie de Rémy Marion, que certains d'entre vous connaissent bien, membre de la société de Géographie, de la société des Explorateurs français, pour effectuer ce périple unique. Spécialiste des ours, auteur des « Métamorphoses de l'ours polaire » et de « Fort comme un ours », ce sera un guide naturaliste de premier ordre, décryptant aussi bien les secrets des ursidés que des glaciers, des morses ou des guillemots mais également prompt à nous rappeler l'épopée des Vikings ou les mythes des Inuits.

L'aboutissement du voyage, quatre jours entre l'Anse-aux-Meadows, Gros Morne à Terre-Neuve, et enfin Saint-Pierre et Miquelon devrait constituer une découverte exceptionnellement émouvante pour beaucoup d'entre nous.

Dr DOMINIQUE LEGLU
Directrice éditoriale de Sciences et Avenir - La Recherche, pôle Sciences du groupe Challenges.

AVEC LA PARTICIPATION DE [2]
RÉMY MARION, Guide, conférencier, spécialiste des ours
ET **DOMINIQUE LEGLU**, Directrice éditoriale de Sciences et Avenir

13 JOURS / 12 NUITS À BORD DE L'EXPLORIS ONE
À PARTIR DE **8 990 €/PERS.** EN TOUT INCLUS [1]

Retrouvez tous les détails de ce voyage exceptionnel sur **www.sa-expedition.fr**
Renseignements | Tél. 01 84 76 22 35 | collection-infini@mycomm.fr

SCIENCES ET AVENIR La Recherche

[1] Voir détails sur la brochure [2] Sous réserve de disponibilité

SARL Mycomm - 40 avenue Raspail - 94250 Gentilly • Immatriculation Atout France IM094100035 • Assurances Professionnelles by Hiscox - Tourisme Pro n° RCE1006 et n° RC1006-PJ0116 • Agence garantie par l'APST • RCS 510 368 400

Concept Graph. Atelier Pascale M (26) Photos © Destination Canada_180002_004 - Nunavut - A9116678

TRANSVERSALES

JOËL HÉRAS/BIOSPHOTO

Grâce à des récepteurs logés à l'extrémité de leurs pattes, les papilllons peuvent « goûter » les objets sur lesquels ils se posent.

L'empire des sens

Le journaliste scientifique britannique Ed Yong offre une immersion passionnante dans le monde sensoriel des animaux.

ALTÉRITÉ Ils « goûtent » à travers leurs pattes ou leur peau, « sentent » par la langue, distinguent les couleurs dans le noir, perçoivent leur milieu en captant les champs électriques, s'orientent grâce au magnétisme terrestre… Les animaux sont dotés d'un éventail inouï de capacités sensorielles, que l'auteur de ce livre très documenté et saisissant nous incite à découvrir.

Dès l'introduction, le lecteur apprend l'existence d'un *umwelt* (un environnement, un univers perceptif) propre à chaque animal, défini par ses sens spécifiques. De cet *umwelt* unique, les humains sont exclus, rappelés à l'humble constat de ne pas détenir le secret d'une vision globale et exclusive de la réalité. Laquelle de fait est multiple et stupéfiante. Accepter de décentrer sa posture, ne plus se fier uniquement à la vue, et faire preuve d'imagination — se mettre dans la peau d'un éléphant d'Asie qui communique à distance grâce aux infrasons, ou bien d'une chauve-souris guidée dans sa chasse par l'écholocation — signifie s'ouvrir à l'immense complexité du monde. Décortiquer chaque sens, du plus connu au plus incroyable, recherches scientifiques à l'appui, est pour l'auteur le chemin vers la reconnaissance de l'altérité. ■

Andreina De Bei

Un monde immense. Comment les animaux perçoivent le monde, Ed Yong, Les Liens qui libèrent, 444 p., 26 €

Ciel mon espace !

ALERTE Observant le ciel de Corse une nuit de 2022, Raphaël Chevrier s'aperçoit que la trace lumineuse d'un satellite strie la nuit toutes les 2 minutes ! Il y a en effet aujourd'hui 7000 satellites en orbite, contre 1000 en 2010. L'auteur se penche sur tous les enjeux soulevés par la démocratisation et la privatisation des activités spatiales : pollution lumineuse, orbites encombrées, tourisme orbital, militarisation de l'espace… ■ **S. R.**

Les Saccageurs de l'espace, Raphaël Chevrier, Buchet-Chastel, 224 p., 19,50 €

L'histoire à multiples prismes

CIVILISATION *« L'histoire du monde a une géographie. Et cette géographie a une histoire. »* Après trois succès réalisés en partenariat avec le magazine *L'Histoire* et *Sciences et Avenir* (*Atlas historique mondial, Atlas de la France, Atlas de la Terre*), Christian Grataloup livre une nouvelle histoire des sociétés humaines vue sous le prisme de sa spécialité, la géohistoire. Son pari : comprendre le présent en faisant appel à la géographie, mais aussi à la géologie, la climatologie, la génétique ou encore l'anthropologie. Un récit passionnant accompagné d'un indispensable atlas de 64 pages. ■ **M. N.**

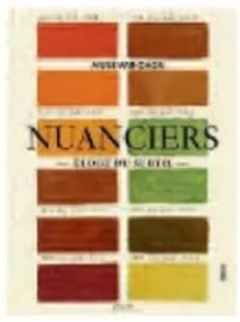
Géohistoire. Une autre histoire des humains sur Terre, Christian Grataloup, Les Arènes, 528 p., 24 €

SOMMAIRE

▶ C'est à lire p. 90
▶ C'est à voir p. 92
▶ Le ciel du mois p. 93
▶ Chroniques p. 94
▶ Questions de lecteurs p. 96
▶ Solutions des jeux p. 97
▶ Jeux p. 98

Des goûts et des couleurs

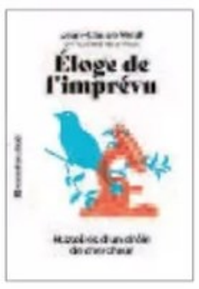
NUANCIERS Amateurs de la couleur, ne ratez pas cet ouvrage ! Un panorama historique magnifiquement illustré des nuanciers qui met en scène la fascination suscitée par les échantillonnages de teintes. Outils pratiques dans lesquels se subliment les compétences et les besoins de chimistes, artisans du pigment, artistes et commerçants, ils reflètent aussi l'évolution du goût. Parmi les 150 étonnants exemples, on retient celui des verres de Murano, et des vestes portées par la chancelière allemande Angela Merkel ! ■ **A. De B.**



Nuanciers. Éloge du subtil, Anne Varichon, Seuil, 284 p., 59 €

L'imprévu, moteur de la recherche

DIALOGUE *« La vie d'un chercheur consiste à chercher quelque chose que l'on ne trouve pratiquement jamais. Mais, des miracles peuvent sortir d'un laboratoire »*, écrit dans son *Éloge de l'imprévu* l'académicien des sciences Jean-Claude Weill.



Sous forme d'un dialogue fictif avec un jeune étudiant, l'immunologiste revient sur ses 40 années de carrière et multiplie les anecdotes sur les découvertes fortuites réalisées par d'autres chercheurs. Un livre plaisant à lire. ■ **L. L.**

Éloge de l'imprévu. Histoires d'un drôle de chercheur, Jean-Claude Weill, Belin, 240 p., 19,90 €

Le numérique en données

SYNTHÈSE Le numérique peut être beau. C'est ce que prouve cet ouvrage qui aborde le sujet sous tous les angles, avec force courbes, schémas, chronologies, cartes et représentations graphiques. On passe de la culture des *hackers* à l'opposition intelligence artificielle symbolique/réseaux de neurones, du cybercrime aux travailleurs du clic, de la gouvernance d'Internet à la notion d'originalité. La forme donne à cet ensemble d'enjeux une belle cohérence. ■ **A. D.**

Atlas du numérique, Dominique Cardon, Sylvain Parasie, Donato Ricci, Presses de Sciences Po, 130 p., 25 €

Fascinants astéroïdes

ESPACE Expert mondial des astéroïdes, Patrick Michel signe l'un des livres les plus complets sur ces objets célestes dont l'étude connaît actuellement son âge d'or. Il explique l'importance de ces corps comme traceurs de l'histoire du Système solaire, le rôle qu'ils auraient joué dans l'émergence de la vie et les ressources minérales qu'ils pourraient fournir. L'astrophysicien détaille aussi les risques qu'ils pourraient représenter si un spécimen de plusieurs centaines de mètres de diamètre venait à percuter notre planète : *« Certes de faible probabilité par rapport à d'autres risques à l'échelle de la vie d'un individu, mais entraînant des conséquences potentiellement catastrophiques »*, rappelle-t-il. L'ouvrage vaut également pour sa touche personnelle, à travers les expériences de l'auteur. Soit les nombreuses missions spatiales auxquelles il a participé, telles les récentes Hayabusa-2 et Osiris-Rex qui ont rapporté des échantillons d'une valeur scientifique inestimable.

■ **Franck Daninos**

À la rencontre des astéroïdes, Patrick Michel, Odile Jacob, 375 p., 25,90 €

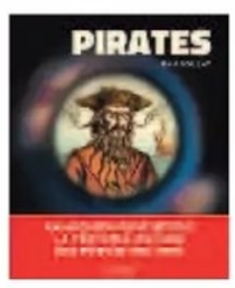
Apprendre à mieux penser

MATHÉMATIQUES Marcus du Sautoy est catégorique : les mathématiques sont l'art du raccourci, du « mieux penser ». On pourrait l'accuser de parti pris : après tout, il est mathématicien (professeur à l'université d'Oxford, au Royaume-Uni). Mais on prend un pari : la démonstration qu'il livre dans cet essai convaincra même les plus sceptiques ! Chacun des dix chapitres qu'il propose revient sur un type de raccourci mathématique — le modèle, la géométrie, le diagramme, la probabilité, etc. — et l'applique à un problème de la vie quotidienne. Les explications qu'il donne, et pour lesquelles il déploie son amour et sa connaissance de l'histoire des mathématiques, ainsi que sa pédagogie et son humour, sont lumineuses. Impossible, par ailleurs, de ne pas partager l'enthousiasme qu'il éprouve pour les virtuosités de son héros, le mathématicien allemand Carl Friedrich Gauss (1777-1855). Une lecture galvanisante. ■ **Vincent Glavieux**

L'Art du raccourci, ou comment mieux penser, Marcus du Sautoy, Héloïse d'Ormesson, 384 p., 23 €

Dure vie de pirate

DÉMYTHIFICATION Jean Soulat, l'un des rares archéologues de la piraterie dans le monde, propose un ouvrage facile d'accès et richement illustré pour en finir avec le cliché du pirate sanguinaire prêt à tout pour quelques pièces d'or et un tonneau de rhum. À travers des portraits de forbans célèbres, à l'instar de Barbe Noire ou Jack Rackham, mais surtout grâce à nombre d'informations sur le quotidien de ces brigands des mers, le lecteur découvrira que la piraterie, qui connut son âge d'or entre la fin du XVII^e^ et le début du XVIII^e^ siècle, était loin de conduire à la vie de pacha. ■ **M. B.**



Pirates, Jean Soulat, Alisio, 160 p., 26,90 €

EXPOSITIONS

Le Bourget (93)

Les années folles de l'aviation
Le thème est plus large que la seule aéronautique : le rôle joué par l'aviation dans les transformations de la société entre 1919 et 1939. Dans l'architecture, les beaux-arts, le cinéma, l'industrie, l'avion devient symbole de modernité.
Musée de l'Air et de l'Espace, 3, esplanade de l'Air et de l'Espace, jusqu'au 3 mars. Rens. : 01.49.92.70.00.

Lyon (69)

À nos amours
Adapté d'une exposition de 2019 au palais de la Découverte, ce parcours permet de découvrir les diverses formes d'attachement, entre amis, en famille. Sociologie, démographie, mais aussi biologie et neurologie sont convoquées.
Musée des Confluences, 86, quai Perrache, jusqu'au 25 août. Rens. : 04.28.38.12.12.

Notre-Dame-de-Bondeville (76)

Eau, source d'énergies
Dans un site où fonctionne encore une roue à aube, l'exposition traite de l'exploitation de la puissance de l'eau. Utilisation des marées, de la houle, dernières innovations, gestion de la ressource…
Musée industriel de la Corderie Vallois, 185, route de Dieppe, jusqu'au 2 juin. Rens. : 02.35.74.35.35.

Paris (75) / Réouverture

Musée national de la marine

Après un chantier de six ans, le Musée national de la marine à Paris a ouvert ses portes le 17 novembre, dévoilant au public quelque 1000 pièces historiques. Une transformation majeure pour cet établissement créé en 1748, après que le physicien, agronome et botaniste français Henri Duhamel de Monceau a fait don au roi Louis XV de sa collection de modèles de navires. Ces prouesses d'artisanat constituent l'espace de visite venant après celui, vaste avec ses 800 m², consacré aux enjeux contemporains (énergies marines, transport vélique). Le visiteur fait ensuite étape au Havre, le port qui relie Paris au monde, avant de plonger dans l'histoire des croisières. Les instruments de navigation, les tempêtes, l'archéologie sous-marine, la marine de guerre à l'origine de nombreuses innovations technologiques, et 13 tableaux grand format de Joseph Vernet, représentant des ports français au XVIIIe siècle, complètent ce parcours foisonnant. Lire notre reportage : sciav.fr/923marine ■ **Sylvie Rouat**

Palais de Chaillot, 17, place du Trocadéro. Rens. : 01.53.65.69.48.

MUSÉE NATIONAL DE LA MARINE/C. SEMENOFF-TIAN-CHANSKY

Le scaphandre en acier mis au point par les frères Carmagnolle en 1882.

Paris (75)

Mission spatiale
Ce nouveau parcours permanent explique le « comment » de l'exploration spatiale. Comment on se déplace, communique, travaille, mais aussi comment on vit dans l'espace, voire sur la Lune ou sur Mars.
Lire notre reportage : sciav.fr/923spatial
Cité des sciences et de l'industrie, 30, avenue Corentin-Cariou. Rens. : 01.85.53.99.74.

Il faut sauver le Joba Mena
Dans un décor de bande dessinée d'aventure, l'exposition s'inspire d'une histoire vraie : la quête par des scientifiques d'un spécimen femelle de poisson de Madagascar, le Joba Mena, pour sauver cette espèce.
Aquarium tropical de Paris, 293, avenue Daumesnil, jusqu'au 1er septembre. Rens. : 01.53.59.58.60

Rennes (35)

Intelligences, différentes par nature
L'intelligence n'est pas le propre de l'humain : bactéries, végétaux, animaux et, bien sûr, l'intelligence artificielle sont autant de variations sur un sujet très débattu.
Espace des sciences, Les Champs Libres, 10, cours des Alliés, jusqu'au 10 mars. Rens. : 02.23.40.66.51.

Saint-Étienne (42)

La mécanique de l'art
Après une année de travaux, le musée a revu son exposition permanente, nouant un dialogue entre œuvres d'art et objets industriels. Trois parcours thématiques relatifs aux manufactures stéphanoises d'armes, de cycles et à la rubannerie sont notamment proposés.
Musée d'Art et d'Industrie, 2, place Louis-Comte. Rens. : 04.77.49.73.00.

Toulouse (31)

LuneXplorer
En quarante minutes, cette expérience immersive fait passer le visiteur par toutes les étapes d'un voyage spatial vers la Lune, de la composition de l'équipage au débriefing de retour de mission. Le tout dans une capsule !
Cité de l'espace, avenue Jean-Gonord. Rens. : 05.67.22.23.24.

Scannez ce QR code et retrouvez toutes les expositions dans notre guide

LE CIEL DE JANVIER

PAR JOHAN KIEKEN

Où sont les planètes ?

MERCURE La petite planète atteint sa plus grande distance angulaire (23,5°) à l'ouest du Soleil le 12. Elle est visible bas vers le levant durant les trois premières semaines du mois environ, non loin du phare que constitue la planète Vénus.

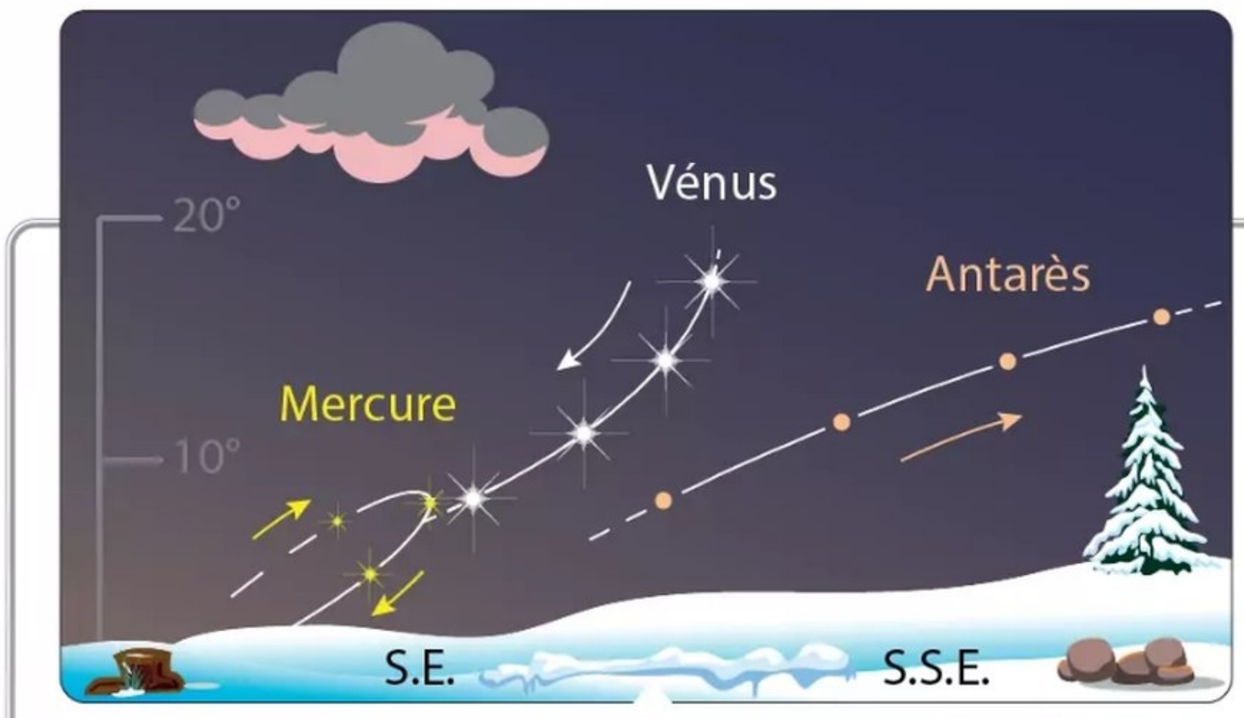
VÉNUS L'étincelante étoile du Berger est observable au petit matin mais voit sa hauteur rapidement diminuer au fil du mois. Le 1er, elle se lève 3 h avant le Soleil mais ne le fait que 1h45 avant lui 30 jours plus tard. Ses conditions d'observation vont encore se dégrader le mois prochain *(lire aussi ci-contre)*.

MARS La planète Rouge n'est pas visible, encore trop proche de la direction du Soleil le matin.

JUPITER La planète la plus imposante du Système solaire domine largement le ciel de première moitié de nuit. Lorsque l'obscurité s'installe, Jupiter est proche de sa culmination. Très brillante, située alors à une bonne cinquantaine de degrés de hauteur dans la direction du sud, elle attire irrésistiblement l'œil. Occupant actuellement la constellation du Bélier, elle se couche en milieu de nuit.

SATURNE La planète aux anneaux est observable en soirée vers le couchant, dans la pâle constellation du Verseau.

LIGHT POLLUTION MAP est une application gratuite en français pour Android et iOS, qui inclut des achats intégrés. Elle fournit, entre autres, des cartes de la pollution lumineuse avec géolocalisation. Elle aide ainsi à trouver les endroits les plus sombres près de chez soi pour une meilleure qualité d'observation du ciel nocturne.

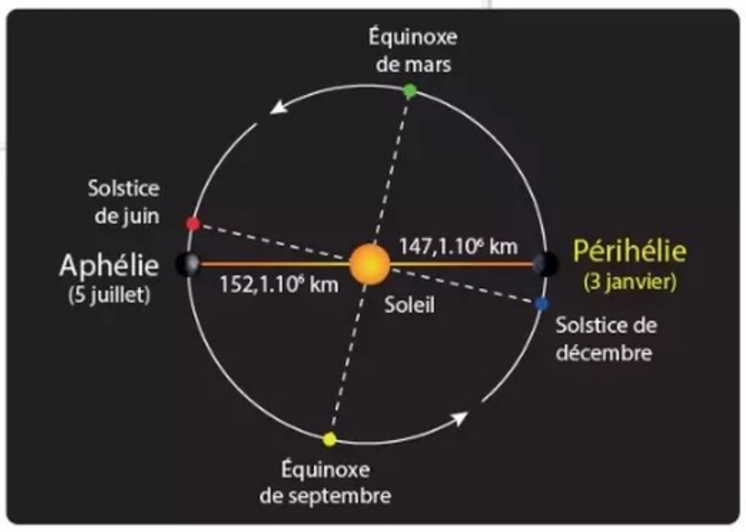


Nous sommes 30 minutes avant le lever du Soleil. Les positions de Vénus et d'Antarès sont indiquées les 1er, 11, 21 et 31 janvier. Celles de Mercure les 1er, 11 et 21.

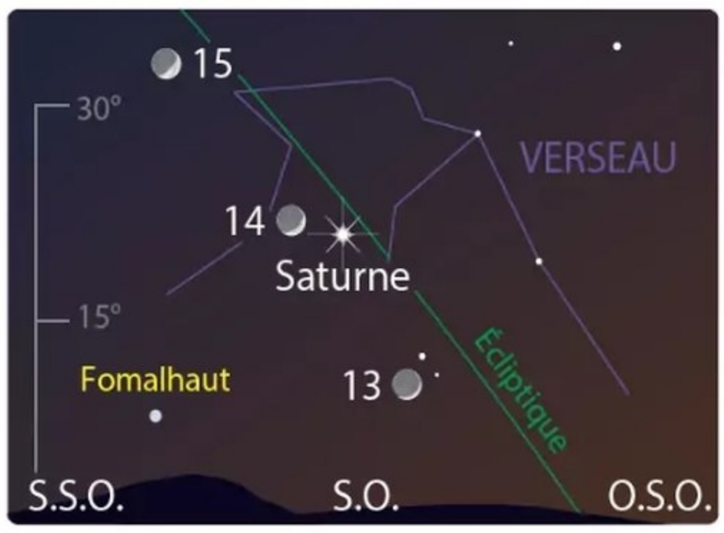
Le déclin de l'étoile du Berger

LA PLANÈTE VÉNUS SE RAPPROCHE lentement de la direction du Soleil et passera derrière lui (en conjonction supérieure) début juin. Janvier est le dernier mois où on peut encore l'observer dans de bonnes conditions. Mercure fait une timide apparition vers le levant alors qu'Antarès du Scorpion, étoile typique des nuits d'été, s'extrait des lueurs de l'aube.

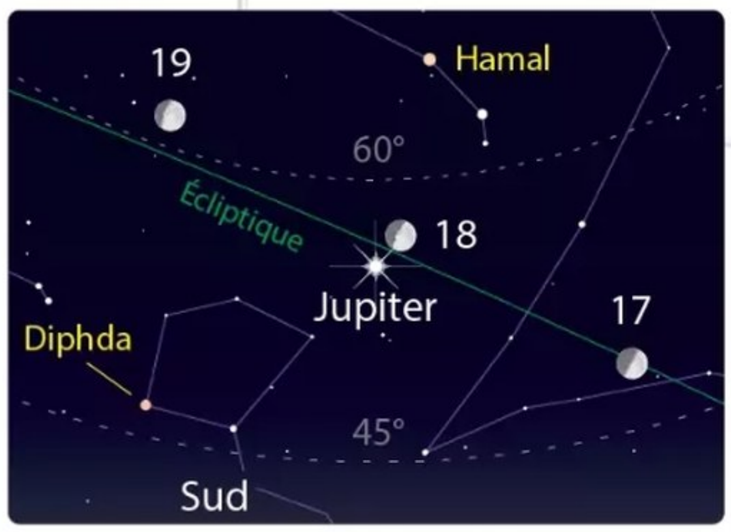
Notre conseil Assurez-vous de disposer d'un horizon sud-est bien dégagé et partez de Vénus, immanquable en raison de son éclat. Une paire de jumelles peut vous aider à trouver Mercure et Antarès.



MERCREDI 3, À 1 H 39 MIN PRÉCISÉMENT, la Terre passera au périhélie. La distance Terre-Soleil atteindra en cet instant son minimum pour 2024 et s'élèvera à 147 100 626 km.



LE SOIR DU 14, 1 H APRÈS LE COUCHER DU SOLEIL, tournez-vous vers le couchant : la Lune en croissant et sa lumière cendrée ne seront qu'à 4° à l'est de la planète Saturne.



LE 18, 2 H APRÈS LE COUCHER DU SOLEIL, le premier quartier de Lune sera proche (2°) de la planète Jupiter. Une scène très facile à admirer, à bonne hauteur dans le ciel !

Scannez ce QR code pour découvrir la carte du ciel de janvier

Céline Guivarch, directrice de recherche à l'École des ponts, auteure principale du 6e rapport du Giec (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat), groupe 3.

Christophe Cassou, directeur de recherche au CNRS, auteur principal du 6e rapport du Giec, groupe 1.

A. BILLET / UNIVERSCIENCE

CLIMAT PAR CÉLINE GUIVARCH ET CHRISTOPHE CASSOU

Transport : un virage difficile à négocier

Le secteur des transports est le premier émetteur de gaz à effet de serre en France : 32 % des émissions territoriales en 2022, dont plus de la moitié (52 %) incombent aux voitures, 25 % aux poids lourds et 15 % aux véhicules utilitaires légers. C'est aussi le seul secteur dont les émissions sont supérieures à leur niveau de 1990, du fait des distances parcourues toujours à la hausse, à la fois pour les personnes et les marchandises, et de l'alourdissement des véhicules qui gomme l'amélioration de l'efficacité des moteurs. Les options pour réduire ces émissions sont nombreuses : éviter des déplacements de personnes et de marchandises grâce à un urbanisme raccourcissant les distances entre domicile, travail, écoles, commerces ; remplacer les modes de transport les plus émetteurs (avion, voiture) par des modes peu émetteurs (rail, transports en commun) ou pas émetteurs pour les courtes distances (vélo, marche) ; réglementer et améliorer les véhicules pour qu'ils soient légers et électrifiés. Cette nouvelle mobilité ne se fera pas sans politiques et mesures structurelles à tous les échelons de gouvernance, pour transformer nos infrastructures et nos modes de vie et donner à tous l'accès à des options décarbonées. Véhicules légers, covoiturage, trains autonomes, vélo… entre progrès technologiques et sobriété d'usage, comment nous déplacerons-nous en 2050 ? Une chose est sûre : pour atteindre la neutralité carbone, le secteur des transports doit se décarboner entièrement en l'espace d'une génération. Un virage serré, à anticiper dès maintenant. La trajectoire « business as usual » (sans changement de méthode) est une sortie de route. ■

Directrice de l'institut Henri-Poincaré, à Paris.

CAMILLE CIER/HANSLUCAS

MATHS PAR SYLVIE BENZONI

Les beaux objets mathématiques

Toucher des objets donne la sensation de mieux comprendre les théories. Depuis toujours, les humains fabriquent des objets porteurs de maths sans forcément le savoir : nœuds, tissus, dés, escaliers, voûtes, etc. Faire un nœud est une manière tangible d'approcher les maths ! Au XIXe siècle, s'est développée une industrie d'objets conçus par des scientifiques pour illustrer toutes sortes de notions en trois ou quatre dimensions. Ces objets ont plus tard été réappropriés par des artistes surréalistes comme l'Américain Man Ray. Rares sont les départements universitaires qui ne possèdent pas d'objets mathématiques. On pourrait croire que l'avènement du numérique les ont remisés au placard. Pas du tout ! Rien de tel, par exemple, que de tirer entre pouces et index sur un bout de caténoïde pour constater qu'il colle parfaitement à un hélicoïde : une image animée n'a pas le même effet Waouh ! On organise même des « Fabrikathons » afin d'imaginer et de réaliser de nouveaux modèles. À l'aide d'outils modernes tels que des imprimantes 3D, ou encore à la main. Une mathématicienne du XXe siècle méconnue, Françoise Pécaut Tison, disparue cette année, autrice d'un livre fascinant sur la « cristallographie mathématique », a consacré une bonne part de sa vie à concevoir, découper, scier, polir des objets merveilleux en bois, carton, plâtre, résine, métal, céramique. La frontière entre maths et art est ténue. ■

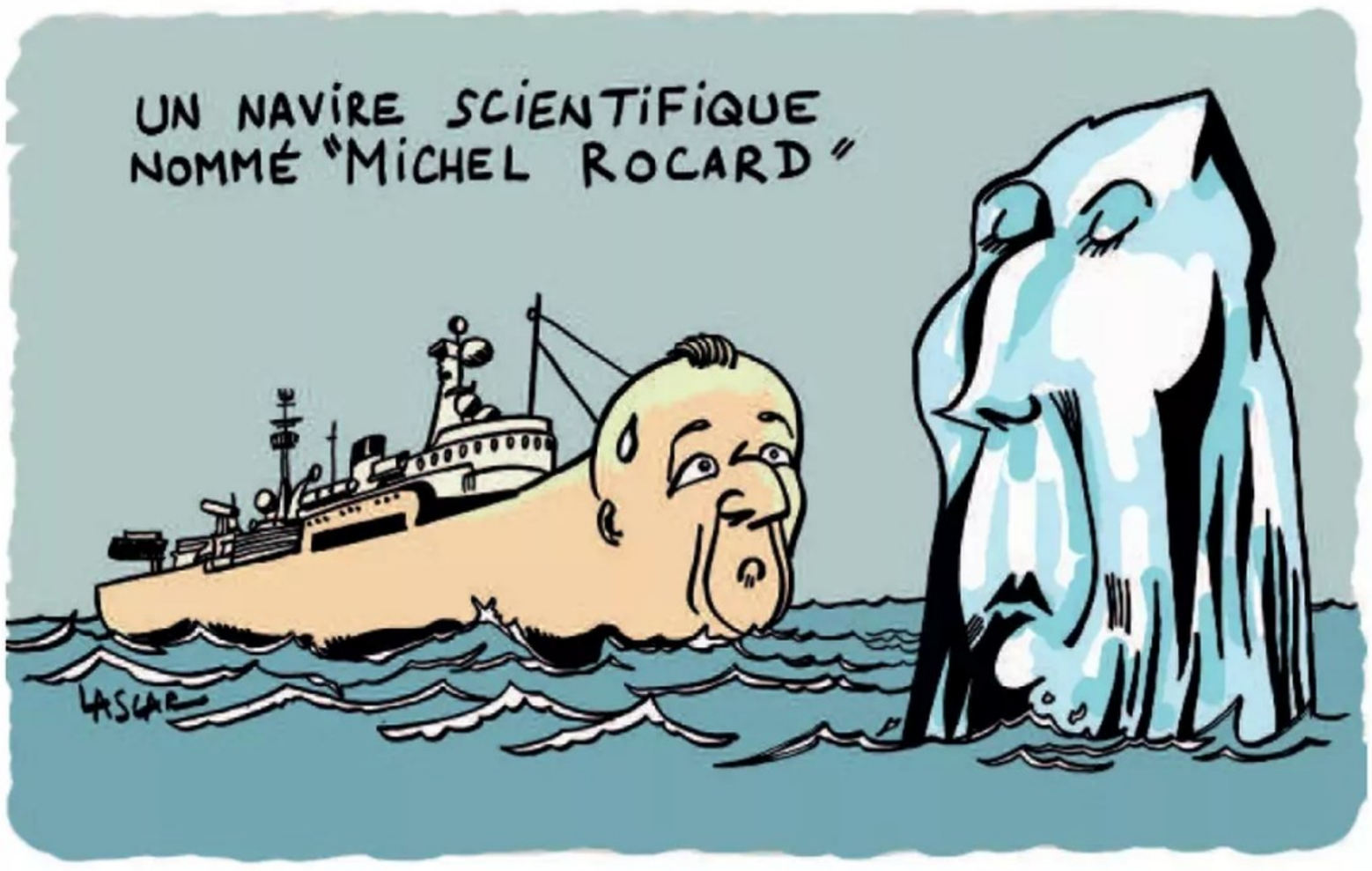
ÉTHIQUE PAR JEAN-GABRIEL GANASCIA

La charité des géants du numérique est-elle ensorcelée ?

Professeur à Sorbonne Université, à Paris, chercheur en intelligence artificielle au LIP6 (Sorbonne Université, CNRS), ex-président du comité d'éthique du CNRS. Dernier ouvrage publié : *Servitudes virtuelles*, Seuil, 2022.

À la suite de la mort de George Floyd en mai 2020 et de l'ampleur du mouvement Black Lives Matter qui s'ensuivit, le directeur général d'IBM, Arvind Krishna, avait envoyé une lettre au Congrès américain pour manifester son inquiétude quant aux conséquences de l'emploi de la reconnaissance faciale sur la surveillance de masse, le profilage racial et la violation des droits de l'homme. Il s'était alors engagé à ce qu'IBM ne livre plus de telles technologies. Auparavant, en 2019, la société Microsoft avait refusé de vendre son savoir-faire en cette matière à une société de police californienne qui souhaitait installer des caméras dans les voitures et sur les équipements de ses agents de service. Et, la société Amazon lui emboîta le pas, s'interdisant, elle aussi, de commercialiser ces technologies. Plus tard, le 27 octobre 2022, Elon Musk a racheté au prix jugé excessif de 44 milliards de dollars la société Twitter afin de restaurer la liberté d'expression qui, selon lui, commençait à être sérieusement menacée. « *L'oiseau est libéré* », s'était-il d'ailleurs exclamé dans un tweet pour souligner ses authentiques motivations. On ne peut qu'admirer la générosité de ces dirigeants de grandes sociétés du numérique qui se soucient tant du bien commun qu'ils n'hésitent pas à renoncer à une part de leurs profits ! On en déplore d'autant plus la malédiction fatale qui s'abat sur ces philanthropes par-devers eux et ruine leurs bonnes intentions. En août dernier, IBM a signé avec la police britannique un contrat de 54,7 millions de livres (63,12 millions d'euros) pour développer une plateforme biométrique qui inclura des outils de reconnaissance faciale. Et on sait qu'Elon Musk, après avoir rouvert les comptes qui avaient antérieurement été fermés parce que diffusant des théories conspirationnistes, s'est senti contraint de suspendre des comptes antifascistes. Pour paraphraser les mots de Rimbaud dans *Une saison en enfer*, la charité des grands acteurs du numérique semble comme ensorcelée… et nous en sommes les prisonniers ! ■

BRUNO LÉVY



L'ŒIL DE LASCAR

L'annonce a été faite pendant le One Planet Polar Summit, à Paris, entre le 8 et le 10 novembre dernier : la France va se dôter d'un nouveau navire capable de conduire des missions scientifiques en zone antarctique. Il sera baptisé *Michel-Rocard* en hommage à celui qui fut le premier ambassadeur des pôles Arctique et Antarctique. L'ancien Premier ministre de François Mitterrand a aussi été l'initiateur des négociations ayant abouti au protocole de Madrid, qui a donné à l'Antarctique son statut protégé. **O. L.**

QUESTIONS DE LECTEURS

Sur notre site **sciencesetavenir.fr,** la rédaction répond à des questions scientifiques posées par nos lecteurs sur notre page **Facebook.** En voici une sélection.

NEUROLOGIE

À quelle vitesse circule l'information dans le cerveau ?

Charly A.

Le flux nerveux électrique circule à 300 km/heure (80 m par seconde environ) à travers les neurones, bien moins que les 270 000 km/s de l'électricité dans un fil de cuivre ou les 300 m/s du son. Selon Michel Thiebaut de Schotten, de l'Institut du cerveau à Paris, *« la taille du cerveau a augmenté avec l'évolution humaine et les délais de communication entre les hémisphères également. Jusqu'au point où il est devenu préférable de faire travailler les hémisphères de façon plus indépendante et donc latéraliser les fonctions »*. Ainsi, les émotions vont plutôt être traitées dans l'hémisphère droit, la lecture et le calcul dans le gauche. ■ **L. L.**

ÉTHOLOGIE

Les animaux se soignent-ils ?

Lucie G.

La médecine n'est pas le propre de l'humain car beaucoup d'espèces animales se soignent. Par exemple, les porcs du Mexique recherchent les racines de grenade qui contiennent un alcaloïde efficace contre les ténias, et le loup à crinière d'Amérique du Sud consomme une plante de la famille des solanacées contre les troubles gastriques. C'est le cas aussi de certains insectes : le papillon monarque, lorsqu'il est infesté par le parasite *Ophryocystis elektroscirrha*, choisit de pondre sur des plantes de la famille des asclépiades qui produisent des molécules antiparasitaires. ■

Anne-Sophie Tassart

MICHEL RAUCH/BIOSPHOTO

Pour lutter contre le froid et le gel, les arbres à feuilles caduques entrent en dormance suivant un processus en deux temps.

BOTANIQUE

Comment les arbres résistent-ils à l'hiver ?

Christian L.

Dès l'automne, les arbres à feuilles caduques subissent des modifications : ils plongent dans un état de dormance, qui consiste en une inhibition de leur croissance, leur permettant d'éviter de pousser et de fleurir pendant les gelées afin de préserver du froid leurs organes dits tendres (bourgeons, tiges, feuilles…). L'entrée en dormance dépend de deux facteurs : le raccourcissement des jours (moins d'exposition au soleil) et la chute des températures. Concrètement, des cellules de l'arbre (les méristèmes) vont être bloquées par un dépôt de glucides (les calloses) empêchant leur croissance. En parallèle, l'arbre déclenche la formation d'écailles autour des futures feuilles et bourgeons afin de les protéger du gel. Se met aussi en place un processus dit d'acclimatation dès l'automne : il commence à utiliser ses réserves de sucres (granules d'amidon) stockées dans les feuilles durant l'été. Puis celles-ci vont tomber. À ce stade, l'arbre reste relativement hydraté, donc pas encore prêt à résister au gel. Les racines ayant du mal à capter l'eau à cause du froid, une déshydratation partielle commence. Les feuilles tombées, l'arbre ne peut plus transpirer, mais l'eau continue de s'évaporer par l'écorce. Les cellules contenant alors moins d'eau, le risque de gel est moindre. À la fin de l'hiver, il peut commencer à se désacclimater pour reprendre sa croissance. ■ **Lise Loumé**

Solutions des jeux parus dans « Sciences et Avenir-La Recherche » n° 922, décembre 2023

Logique culinaire

28 (rang première lettre x 1, rang première lettre x 2, rang première lettre x 3, rang première lettre x 4).

Addition lettriste

Une solution :

1546 + 1546 = 3092

L'égalité dans l'ordre

(9 x 8 x 7) + 6 + 5 x (4 + 3 + 2) / 1 = 555

Panagramme

Mot 1 : AB
Mot 2 : HENRI
Mot 3 : LINS
Mot 4 : HURLUBERLUS
Mot 5 : BN
Mot 6 : HUNES
Mot 7 : SAHIB
Mot 8 : BRAUN
Mot 9 : AI
Mot 10 : ALES
Mot 11 : SIL
Mot 12 : BAHINE
Mot 13 : RHUBARBE
Mot 14 : HURLER
Mot 15 : HUE
Mot 16 : SIN
Mot 17 : HUILER
Mot 18 : NUAS
Mot 19 : BAINS
Mot 20 : SABLE
Mot 21 : RHIN

Logique fléchée

LIGNE 1 : 91, 73, 55, 37, 19 (- 18, - 18, - 18, - 18)
LIGNE 2 : 6, 19, 37, 55, 73 (6, 6 x 3 + 1, 6 x 6 + 1, 6 x 9 + 1, 6 x 12 + 1)
LIGNE 3 : 10, 19, 37, 73, 145 (x 2 - 1, x 2 - 1, x 2 - 1...)
LIGNE 4 : 73, 90, 109, 130, 153 (+ 17, + 19, + 21, + 23)

1 A	B	2 E	H	3 I	L	N	4 R	S	U
5 B	6 E	7 H	N	8 R	U	S	L	9 I	A
N	S	I	R	A	E	L	B	U	H
H	N	S	I	U	B	R	10 A	L	E
11 L	U	A	B	N	12 I	E	S	13 H	R
S	I	14 R	L L	B	H	15 U	E	A	16 N
17 I	R	L	U	E	N	A	H	B	S
R	L	18 U	A	H	19 B	S	N	E	I
E	H	N	S	20 L	A	I	U	R	B
U	A	B	E	S	21 R	H	I	N	L L

Une formidable diversité

11 fois par an, l'actualité des savoirs pour tous

N° 914
Les clés du contrôle de soi

N° 915
Les solutions pour produire son énergie

N° 916 James-Webb : une nouvelle histoire de l'Univers

N° 917/918
Spécial Eau

N° 919 Découvertes sur Alzheimer et Parkinson

N° 920
L'origine du temps

N° 921
Aliments et santé

N° 922
Hommage à Hubert Reeves

Bon de commande

Je commande les numéros ci-après au prix de : 7 € par numéro payable par chèque à l'ordre de *Sciences et Avenir* (port compris pour la France).
Bon de commande à retourner à :

Sciences et Avenir
service des abonnements
45, av. du Général-Leclerc 60643 Chantilly Cedex

❑ N° 914 ❑ N° 915 ❑ N° 916 ❑ N° 917/918
❑ N° 919 ❑ N° 920 ❑ N° 921 ❑ N° 922

Nom : .....
Adresse : ..... Ville : .....
.....
Code postal : .....

PAR PIERRE BERLOQUIN

Énigmes, logique et mathématiques

Retrouvez chaque mois des problèmes ludiques pour exciter votre curiosité. Solutions dans le prochain numéro.

Einstein en rouge

Selon quelle logique certaines lettres de cette phrase sont-elles en rouge ?

Le sort de l'humanité en général sera celui qu'elle méritera.

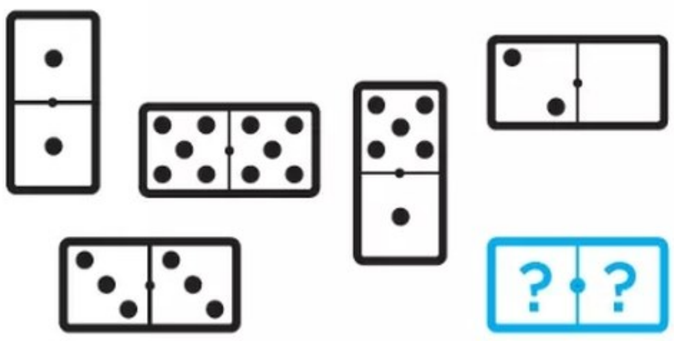
0 1 2 3 4 6 7 8 9 10 11 12

Avec les chiffres 3, 4, 5, 6 dans cet ordre, et, en s'aidant des 4 opérations et des parenthèses, obtenez par calcul chacun des 12 nombres ci-dessus. Il y a souvent plusieurs solutions.

Par exemple : - 3 + 4 + 5 - 6 = 0.

Domino, domino...

Quel domino manque ?



Carré (presque) logique

Dans ce carré, les lettres sont disposées suivant une certaine logique. Corrigerez-vous l'erreur ?

P	Q	R	S	P
Q	P	S	P	Q
R	S	P	Q	R
S	R	Q	R	S
P	Q	R	S	P

Carré latin

		14		30	12			19	9
	45	23	45	6	9	38	23	45	16	30
14	8	13								
18	1	19								
	19	20								
		39								
	7	21								
	37	7								
	17	26								
	20	18								
	16	18								
9	9	8								

Chaque ligne et chaque colonne, toutes différentes, sont composées des nombres de 0 à 9. Les sommes des segments blancs, horizontaux et verticaux, figurent en marge.

Complétez la grille.

Énigmes Créalude, Pierre Berloquin, Jean-Thierry Garrigues

tech&fest

CÉLÉBRER LE MEILLEUR DE L'INNOVATION, ENSEMBLE !

10 000 visiteurs BtoB • 3 000 jeunes • +500 startup

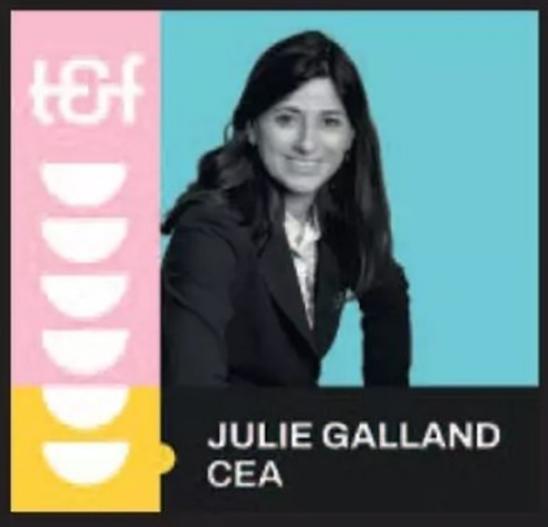
Votre billet gratuit
avec le code
SCIENCES

1ÈRE ÉDITION

1-2 FÉVRIER 2024

ALPEXPO GRENOBLE

PARMI 100 SPEAKERS, VOUS RENCONTREREZ NOTAMMENT



REJOIGNEZ DÈS MAINTENANT LA COMMUNAUTÉ DES ENTREPRISES LES PLUS INNOVANTES DE FRANCE !

www.tech-fest.fr

nouveau

CRÉATION ÉPHÉMÈRE N°5

Un trésor gustatif rare issu de grains
Arabica Bourbon du Rwanda

LIMITED CREATIONS

L'OR

ESPRESSO

ARABICA
BOURBON

100% RWANDA SINGLE-ORIGIN

x10

L'OR SANS DOUTE LE MEILLEUR CAFÉ DU MONDE

JACOBS DOUWE EGBERTS FR SAS | 30 BIS, RUE DE PARADIS, 75010 PARIS, FRANCE, 810 029 413 RCS PARIS | SAS AU CAPITAL DE 16 594 157,70 EU ROS.